
Bachelorarbeit

Herr
Florian Kretzschmar

Vergleichende Untersuchung von Stirnplatten- Berechnungsverfahren

Mittweida, 2017

Fakultät Maschinenbau

Bachelorarbeit

Vergleichende Untersuchung von Stirnplatten- Berechnungsverfahren

Autor:

Herr Florian Kretzschmar

Studiengang:

Stahl- und Metallbau

Seminargruppe:

SM10w1-B

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing Torsten Laufs

Zweitprüfer:

Prof. Dr.-Ing Matthias Ziegenhorn

Einreichung:

Mittweida, 02.03.2017

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2017

Faculty Mechanical Engineering

Bachelor Thesis

Comparative Analysis of Endplates - Calculation Methods

author:

Florian Kretzschmar

course of studies:

Steel and Metal Construction

seminar group:

SM10w1-B

first examiner:

Prof. Dr.-Ing Torsten Laufs

second examiner:

Prof. Dr.-Ing Matthias Ziegenhorn

submission:

Mittweida, 02.03.2017

defence/ evaluation:

Mittweida, 2017

Bibliografische Beschreibung:

Kretzschmar, Florian:

Vergleichende Untersuchung von Stirnplatten-Berechnungsverfahren. - 2017. -
<VI>, <77 <22> S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Mechanical Engineering, Bachelor
Thesis, 2017

Referat:

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist, den Leser ein allgemeines Verständnis über geschraubte Stirnplattenverbindungen zu vermitteln. Es wird auf grundlegende Themenbereiche für diese Anschlussform eingegangen. Des Weiteren werden ausgewählte Bemessungsverfahren für zweireihige Stirnplattenverbindungen beschrieben, beispielhaft dargestellt und graphisch verglichen. Die Vergleiche sollen die Ausnutzungsgrade und die Anwendungsgrenzen der Verfahren aufzeigen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis und Abkürzungsverzeichnis.....	VI
1 Einführung.....	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Zielstellung	1
1.3 Abgrenzung.....	2
2 Grundlagen.....	3
2.1 Plastische Querschnittstragfähigkeit	3
2.2 Das statische Ersatzmodell.....	5
2.3 Einfluss der Schraubenvorspannung	8
2.4 Gefahr von Terrassenbrüchen	10
3 Zweireihige Stirnplattenverbindungen am Doppel-T-Träger.....	12
3.1 Beschreibung von Berechnungsverfahren	12
3.1.1 Bemessungsverfahren nach DIN 18800 für überstehende Stirnplatten	13
3.1.2 Bemessungsverfahren nach DIN 18800 für bündige Stirnplatten	17
3.1.3 Bemessungsverfahren nach DIN EN 1993-1-8.....	21
3.2 Zahlenbeispiel.....	31
3.3 Gegenüberstellung von Stirnplatten Berechnungsverfahren.....	40
3.3.1 Vergleich 1.....	41
3.3.2 Vergleich 2.....	44
3.4 Zusammenfassung.....	47
4 Zweireihige Stirnplattenverbindungen an Rechteck-Hohlprofilen..	48
4.1 Beschreibung von Berechnungsverfahren	48
4.1.1 Bemessungsverfahren nach AISI	48
4.1.2 Bemessungsverfahren nach Cidect.....	51
4.1.3 Bemessungsverfahren nach DIN EN 1993-1-8.....	56
4.2 Gegenüberstellung von Stirnplatten Berechnungsverfahren.....	60
4.2.1 Vergleich 3.....	61
4.2.2 Vergleich 4.....	64
4.2.3 Vergleich 5.....	67
4.2.4 Vergleich 6.....	70
4.2.5 Gegenüberstellung der Berechnungsverfahren gegen Versuche	73
4.3 Zusammenfassung.....	75
5 Zusammenfassung und Ausblick.....	77

Literaturverzeichnis	78
Normen und Internetquellen.....	79
Programme	80
Anhänge	A-J
Selbstständigkeitserklärung	

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Spannungszustände eines auf Biegung beanspruchten Rechteckquerschnittes .	3
Abb. 2 Seitenansicht des Anschlusses	5
Abb. 3 Statisches Ersatzmodell des Anschlusses	5
Abb. 4 Statisches Ersatzmodell nach Fließgelenktheorie	5
Abb. 5 Angepasstes Ersatzmodell	6
Abb. 6 Grenztragfähigkeit [kN] in Abhängigkeit von der Stirnplattendicke [mm]	7
Abb. 7 Einfluss der Vorspannung auf die zugbelastete Schraube	8
Abb. 8 Belastungsdiagramm einer vorgespannten Schraube	9
Abb. 9 Terrassenbruch [C4], S.15, Bild 3.1	10
Abb. 10 Geometrieübersicht	14
Abb. 11 Statisches Ersatzmodell für den Versagensmodus Schraubenversagen unter Abstützkräften.....	15
Abb. 12 Statisches Ersatzmodell für den Versagensmodus Plattenversagen	15
Abb. 13 Statisches Ersatzmodell für den Versagensmodus Schraubenversagen ohne Abstützkräfte	16
Abb. 14 Darstellung des Hebelarms für die Berechnung der Momententragfähigkeit	16
Abb. 15 Übersicht über das Ersatzmodell und die Hebelarme.....	18
Abb. 16 Ersatzmodell für den Versagensmodus Plattenversagen	19
Abb. 17 Ersatzmodell für den Versagensmodus Schraubenversagen unter Abstützkräften	20
Abb. 18 Hebelarm für den Versagensmodus Schraubenversagen ohne Abstützkräfte .	20
Abb. 20 Geometriedefinition im nichtausgesteiften Bereich.....	22
Abb. 21 Geometriedefinition im ausgesteiften Bereich	22

Abb. 22 Auszug aus Bild 5 Fließmuster für T-Stummel [16], S. 3, Bild 5	22
Abb. 23 Lage der Schraubenreihen	23
Abb. 24 Statisches Ersatzmodell im Versagensmodus Plattenversagen mit Abstützkräften	25
Abb. 25 Statisches Ersatzmodell im Versagensmodus Plattenversagen ohne Abstützkräften	25
Abb. 26 Statisches Ersatzmodell im Versagensmodus Schraubenversagen mit Abstützkräften	25
Abb. 27 Statisches Ersatzmodell im Versagensmodus Schraubenversagen ohne Abstützkräften	26
Abb. 28 Lage der Schraubenreihe	26
Abb. 29 Auszug aus Tabelle 6.1 Grundkomponenten der Anschlüsse [C2] S.67, Tabelle 6.1	27
Abb. 30 Lage der Schraubenreihe	28
Abb. 31 Darstellung der Berechnungshebelarme	29
Abb. 32 Geometrieübersicht Vergleich 1 (IPE 450)	41
Abb. 33 Grenzanschlussmomente für Vergleich 1	42
Abb. 34 Geometrieübersicht Vergleich 2 (HEB 220)	44
Abb. 35 Grenzanschlussmomente für Vergleich 2	45
Abb. 36 Geometriedefinition	48
Abb. 37 Statisches Ersatzmodell für den Versagensmodus Schraubenversagen unter Abstützkräften	49
Abb. 38 Statisches Ersatzmodell für den Versagensmodus Plattenversagen	50
Abb. 39 Geometriedefinition	51
Abb. 40 Statische Ersatzmodelle für den Versagensmodus Plattenversagen	53

Abb. 41 Statisches Ersatzmodell für den Versagensmodus Schraubenversagen unter Abstützkräften	54
Abb. 42 Mögliche Belastungsrichtungen	55
Abb. 43 Geometriedefinition.....	56
Abb. 44 Statisches Ersatzmodell im Versagensmodus Plattenversagen mit Abstützkräften	58
Abb. 45 Statisches Ersatzmodell im Versagensmodus Schraubenversagen mit Abstützkräften	58
Abb. 46 Statisches Ersatzmodell im Versagensmodus Schraubenversagen ohne Abstützkräften	59
Abb. 47 Berechnungshebelarm.....	59
Abb. 48 Anschlussgeometrie Vergleich 3.....	61
Abb. 49 Grenztragfähigkeiten für Vergleich 3 mit Teilsicherheitsbeiwerten	62
Abb. 50 Grenztragfähigkeiten für Vergleich 3 ohne Teilsicherheitsbeiwerten	63
Abb. 51 Anschlussgeometrie Vergleich 4.....	64
Abb. 52 Grenztragfähigkeiten für Vergleich 4 mit Teilsicherheitsbeiwerten	65
Abb. 53 Grenztragfähigkeiten für Vergleich 4 ohne Teilsicherheitsbeiwerten	66
Abb. 54 Anschlussgeometrie Vergleich 5.....	67
Abb. 55 Grenztragfähigkeiten für Vergleich 5 mit Teilsicherheitsbeiwerten	68
Abb. 56 Grenztragfähigkeiten für Vergleich 5 ohne Teilsicherheitsbeiwerten	69
Abb. 57 Anschlussgeometrie Vergleich 6.....	70
Abb. 58 Grenztragfähigkeiten für Vergleich 5 mit Teilsicherheitsbeiwerten	71
Abb. 59 Grenztragfähigkeiten für Vergleich 5 ohne Teilsicherheitsbeiwerten	72
Abb. 60 Geometrien der Versuchsverbindungen [14]	73

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Einflüsse auf die Anforderung Z_{Ed} [C4], S.17, Tabelle 3.2	11
Tab. 2 Stahlgütewahl nach EN 10164 [C1], S.29, Tabelle 3.2.....	12
Tab. 3 Auszug aus Tabelle 6.6 Wirksame Längen für Stirnbleche [C2], S. 90, Tabelle 6.6	23
Tab. 4 Auszug aus Tabelle 6.6 Wirksame Längen für Stirnbleche [C2], S. 90, Tabelle 6.6	26
Tab. 5 Wirksame Längen für Stirnbleche [C2], S.91, Bild 6.11	26
Tab. 6 Auszug aus Tabelle 6.6 Wirksame Längen für Stirnbleche [C2], S. 90, Tabelle 6.6	28
Tab. 7 Auszug aus Tabelle 6.6 Wirksame Längen für Stirnbleche [C2], S. 90, Tabelle 6.6	57
Tab. 8 Teilsicherheitsbeiwerte der Bemessungsverfahren	60
Tab. 9 Gemessene Materialfestigkeiten und Grenzzugkräfte der Schrauben [14]	73
Tab. 10 Gegenüberstellung der Grenztragfähigkeit (maximale Kraft T_{ux} [14])	74
Tab. 11 Gegenüberstellung der Abweichungen zu den Versuchsergebnissen aus [14]	74
Tab. 12 Rechnerischer Flansch-Schraubenabstand der Berechnungsverfahren.....	76

Abkürzungsverzeichnis

EC 3	DIN EN 1993
Ringbuch	Bemessungshilfe „Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau “

1. Einführung

1.1 Einleitung

Verbindungen zwischen Trägern sind im Stahlbau unerlässlich. Alte Stahlkonstruktionen zeigen, dass Verbindungen mit Hilfe von Nieten realisiert wurden. Der Lastabtrag dieser Verbindung wird ausschließlich über Scherkräfte realisiert. Der geschraubte Ableger der Nietverbindung ist der Laschenstoß. Verbindungen bei denen die Schrauben als Zugtragglieder beansprucht werden, haben im Laufe der Zeit immer mehr an Bedeutung gewonnen. Eindeutiger Vorteil geschraubter Stirnplattenverbindung ist die Montagefreundlichkeit. Erste Untersuchungen an Stirnplattenverbindungen wurden bereits in den 1960er-Jahren durchgeführt. Im Jahre 1979 veröffentlichte der Deutsche Stahlbau-Verband (DSTV) erstmals Bemessungstabellen mit typisierten biegesteifen Anschlüssen. Die Bemessungstabellen basieren auf Algorithmen die mit Hilfe von Versuchen erstellt beziehungsweise kalibriert wurden. Die für das DSTV Ringbuch zur Anwendung kommenden Berechnungsverfahren wurden 1982 im „Stahlbau Handbuch“ [4] veröffentlicht. Im Jahre 2000 ist die erste Neuauflage des DSTV Ringbuches auf Basis der Vornorm DIN ENV 1993 erschienen. Mit der Normumstellung 2012 wurde auch ein neues Berechnungsverfahren für geschraubte Stirnplattenanschlüsse bindend. Die aktuellste Auflage des Standardwerkes „Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau nach DIN EN 1993-1-8“ wurde 2013 veröffentlicht und basiert auf der DIN EN 1993-1-8. Versuche an Hohlprofil-Stirnplattenanschlüssen mit zweireihigen Schraubenbild wurden in den 1980 Jahren durchgeführt. Eine ausführliche Versuchsdokumentation einer solchen Anschlussvariante ist 1989 in der Fachzeitschrift Journal of Structural [14] erschienen. Der Weltverband der Hohlprofilhersteller (Cidect) stellte 1993 ein Berechnungsalgorithmus für Hohlprofilstirnplattenanschlüsse vor. Ein weiteres Berechnungsverfahren ist im „Steel Design Guide 24“ [10] zu finden, welcher vom American Institut of Steel Construction (AISC) herausgegeben wurde. In jüngerer Zeit veröffentlicht die Universität Sydney umfassende Berichte zum Thema biegebeanspruchte Hohlprofil-Stirnplattenverbindungen.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Bachelorarbeit ist die detaillierte Beschreibung und Gegenüberstellung ausgewählter Berechnungsverfahren an Stirnplattenverbindungen mit zweireihigen Schraubenbild, welche auf Biegung oder Zug belastet werden können. Es werden Verbindungen für Doppel-T-Profile und Vierkant-Hohlprofile berücksichtigt. Die Beschreibungen die anhand von Beispielen verdeutlicht werden, können zur Nachweisführung von Stahlbauten genutzt werden. Mithilfe von Gegenüberstellungen der Grenztragfähigkeiten, die graphisch ausgewertet werden, sollen Ausnutzungsgrade und Anwendungsgrenzen der Verfahren aufgezeigt werden. In den ersten Kapiteln dieser Arbeit wird auf grundlegende und relevante Themenbereiche für diese Anschlussform eingegangen.

1.3 Abgrenzungen

In dieser Bachelorarbeit werden ausschließlich zweireihige Stirnplattenverbindungen für Vierkant-Hohlprofile und Doppel-T-Profile behandelt. Querkraftbeanspruchungen der Verbindungen bleiben in den Beschreibungen sowie in den Gegenüberstellungen unberücksichtigt. Die Vergleiche der Doppel-T-Trägerverbindungen werden ausschließlich an momentenbeanspruchten Anschlüssen dargestellt. Für Hohlprofilanschlüsse beschränken sich die Gegenüberstellungen auf Normalkraftbelastung.

2. Grundlagen

2.1 Plastische Querschnittstragfähigkeit

In allen vorgestellten Berechnungsverfahren für Stirnplattenanschlüsse wird das plastische Widerstandsmoment für die Berechnung genutzt. Aus diesen Grund wird ein kurzer Überblick zur Thematik gegeben.

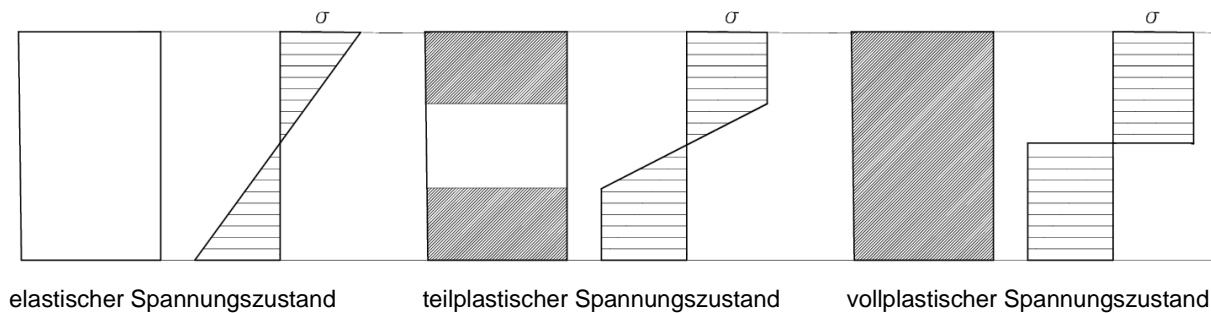


Abb. 1 Spannungszustände eines auf Biegung beanspruchten Rechteckquerschnittes

Die oben stehenden Abbildungen zeigen einen Rechteckquerschnitt der bis zum vollen plastischen Spannungszustand belastet wird (Momentenbeanspruchung). Nach überschreiten des elastischen Spannungszustandes beginnt die Plastifizierung des Grundmaterials von den äußeren Bereichen in das innere des Querschnitts. Dabei erhöhen sich die Dehnungen. Die Spannungen im Material überschreiten die elastische Grenzspannung nicht, wenn eine Aufhärtung des Materials infolge plastischer Verformung unberücksichtigt bleibt. Im vollplastischen Spannungszustand sind die Dehnungen unendlich groß. Demzufolge ist dieser Zustand nur theoretisch zu erreichen. Im Anhang A wird anhand einer Beispielrechnung gezeigt, dass bereits bei der vierfachen elastischen Grenzdehnung 96 % des plastischen Widerstandsmomentes erreicht sind (Rechteckquerschnitt). Tritt nach einer Belastung die einen plastischen Spannungszustand hervorgerufen hat eine vollständige Entlastung ein, hat dies Eigenspannungen zur Folge. Eine erneute Belastung ist nun bis auf das Niveau der Erstbelastung möglich, ohne dass weitere plastische Verformungen hervorgerufen werden.

Rechnerische Ermittlung des plastischen Widerstandsmomentes

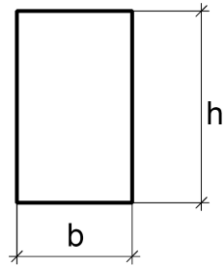
Das plastische Widerstandsmoment ermittelt sich aus dem zweifachen statischen Moment.

$$W_{pl} := 2 \cdot S_y$$

Beispielhafte Ermittlung des plastischen Widerstandsmomentes am Rechteckquerschnitt

$$h = 25\text{cm}$$

$$b = 15\text{cm}$$



Elastisches Widerstandsmoment

$$W_{el} := \frac{h^2 \cdot b}{6} = 1.562 \times 10^3 \text{ cm}^3$$

Statisches Moment

$$S := \frac{h}{2} \cdot b \cdot \frac{h}{4} = 1.172 \times 10^3 \text{ cm}^3$$

Plastisches Widerstandsmoment

$$W_{pl} := 2 \cdot S = 2.344 \times 10^3 \text{ cm}^3$$

Plastische Querschnittsreserve

$$\frac{W_{pl}}{W_{el}} = 1.5$$

Dividiert man das elastische Widerstandsmoment durch das plastische Widerstandsmoment erhält man die plastische Querschnittsreserve.

Aufgrund der Tatsache, dass die plastische Querschnittsreserve von Rechteckquerschnitten 1,5 beträgt, kann das plastische Widerstandsmoment mit folgender Formel bestimmt werden.

$$W_{pl} := \frac{h^2 \cdot b}{4}$$

2.2 Das statische Ersatzmodell

Um ein allgemeines Verständnis über die vorgestellten Berechnungsverfahren zu erlangen, wird in diesem Kapitel auf das statische Ersatzsystem eingegangen, welches bei nahezu allen vorgestellten Berechnungsalgorithmen zur Anwendung kommt. Dabei wird die plastische Tragwerksreserve zum Ansatz gebracht. Das statische Ersatzsystem besteht aus einem Träger auf zwei Stützen mit Kragarm (eingespannt und in vertikaler Richtung frei verschieblich). In Schrauben- und Flanschebene bilden sich plastische Fließgelenke aus.

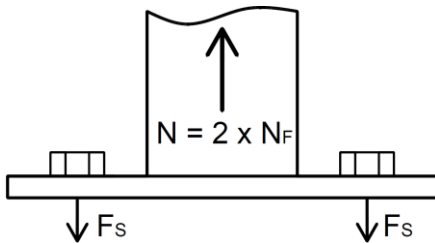


Abb. 2 Seitenansicht des Anschlusses

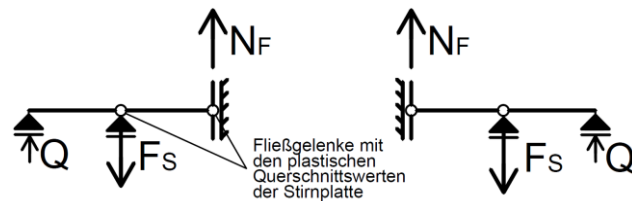
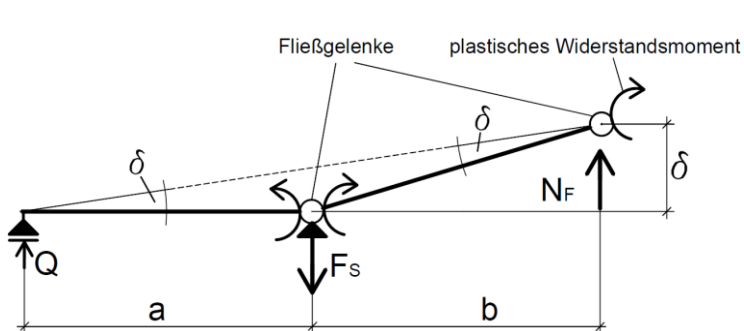


Abb. 3 Statisches Ersatzmodell des Anschlusses

Ermittlung der plastischen Tragfähigkeit mithilfe des Prinzips der virtuellen Verrückung



$$F_S \cdot \delta - M_{Pl} \cdot \left(\frac{\delta}{a} + 2 \cdot \frac{\delta}{b} \right) = 0$$

$$\delta \cdot \left[F_S - M_{Pl} \cdot \left(\frac{1}{a} + 2 \cdot \frac{1}{b} \right) \right] = 0$$

$$F_{S.} := M_{Pl} \cdot \left(\frac{1}{a} + 2 \cdot \frac{1}{b} \right)$$

F_S = Schraubenzugkraft bei Plattenversagen Q = Abstützkräfte

Abb. 4 Statisches Ersatzmodell nach Fließgelenktheorie

Über das Prinzip der virtuellen Verrückung wird die Schraubenkraft bestimmt bei der die Stirnplatte versagt. Demzufolge kann folgende Aussage getroffen werden. Ist das ermittelte F_S größer als die Zugtragfähigkeit der Schraube, wird Schraubenversagen unter Abstützkräften maßgebend. Ist F_S kleiner als die Zugtragfähigkeit der Schraube wird Plattenversagen maßgebend.

$$F_{S.} := 0.5 M_{Pl} \cdot \left(\frac{1}{a} + 2 \cdot \frac{1}{b} \right) < F_t = \text{Plattenversagen}$$

$$F_{S.} := 0.5 M_{Pl} \cdot \left(\frac{1}{a} + 2 \cdot \frac{1}{b} \right) > F_t = \text{Schraubenversagen}$$

Mit dem Faktor 0,5 wird ein zweireihiges Schraubenbild berücksichtigt

Flanschzugkraft N_F

Um die Grenztragfähigkeit des Anschlusses bestimmen zu können, muss die Flanschzugkraft N_F ermittelt werden. Dabei geht man von zwei Versagensszenarien des Anschlusses aus:

1. Stirnplattenversagen infolge Plattenbiegung
2. Schraubenversagen infolge Zugbelastung und Abstützkräften

Der kleinere Wert wird maßgebend!

Angepasstes Ersatzmodell bei Schraubenversagen unter Abstützkräften

In allen vorgestellten Berechnungsverfahren wird zwischen zwei Versagensszenarien unterschieden. Zum einen Plattenversagen und zum anderen Schraubenversagen unter Abstützkräften. Im Versagensszenario Schraubenversagen unter Abstützkräften wird dabei ein angepasstes statisches Modell angewendet (Abb. 5), welches von der herkömmlichen Fließgelenktheorie abweicht.

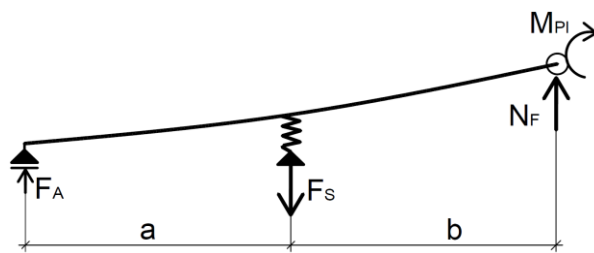


Abb. 5 Angepasstes Ersatzmodell

Es wird davon ausgegangen, dass sich nur ein Fließgelenk in der Stirnplatte ausbildet. Dieses liegt im Flanschbereich des Profils. Die Anpassung des Modells kann damit begründet werden, dass die Schraube aufgrund ihrer Nachgiebigkeit statisch als Feder wirkt. Damit wird die

Plattenbeanspruchung in der Schraubenebene geringer. Auf den folgenden Seiten werden die unterschiedlichen Ersatzsysteme beschrieben sowie graphisch verglichen.

Maximale Flanschzugkraft bei Schraubenversagen unter Abstützkräften N_F

Fließgelenktheorie

Schraubenkraft bei Plattenversagen

$$F_S := 0.5 M_{pl} \cdot \left(\frac{1}{a} + 2 \cdot \frac{1}{b} \right)$$

Faktor

$$\alpha := \frac{F_S}{F_t} \quad F_t = \text{Grenzzugkraft der Schraube}$$

$$N_F := \frac{2 \cdot M_{pl}}{b \cdot \alpha}$$

Angepasste Fließgelenktheorie

$$N_F := \frac{1}{a + b} \cdot (a \cdot 2 \cdot F_t + M_{pl})$$

Der kleinere Wert der Flanschzugkraft wird maßgebend!

Graphische Darstellung des Sachverhaltes

Auf der folgenden Seite werden die maßgebenden Flanschzugkräfte der herkömmlichen und angepassten Fließgelenktheorie graphisch verglichen. Die Kurven zeigen die Grenztragfähigkeiten [kN] in Abhängigkeit von der Stirnplattendicke.

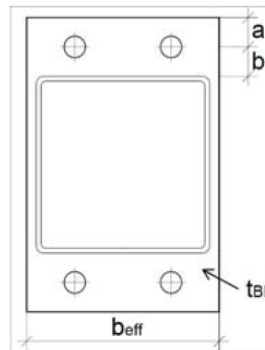
Geometrie und Materialkennwerte für das gewählte Beispiel (Anhang B)

Streckgrenze Platte

$$f_y := 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Grenzzugkraft Schraube M16 10.9

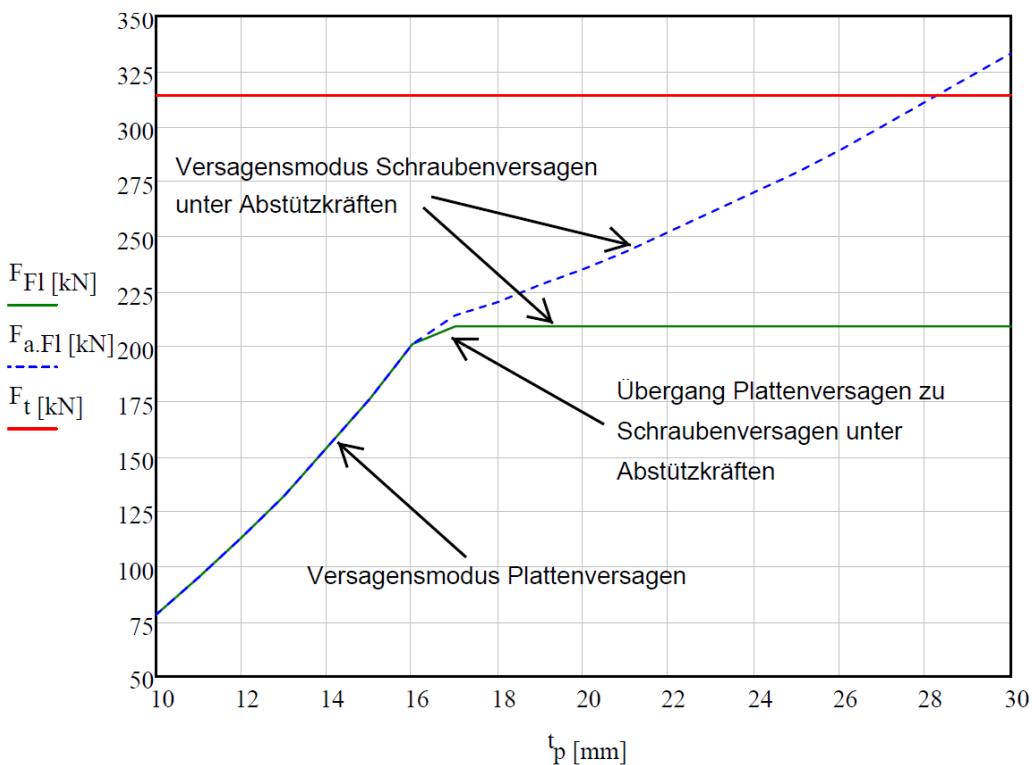
$$F_t := 1.57 \text{cm}^2 \cdot 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 157 \cdot \text{kN}$$



$$a := 30 \text{mm}$$

$$b := 30 \text{mm}$$

$$b_{\text{eff}} := 200 \text{mm}$$



F_{Fl} = Fließgelenktheorie

$F_{\text{a.Fl}}$ = angepasste Fließgelenktheorie

F_t = Grenzzugkraft Schraube

Abb. 6 Grenztragfähigkeit [kN] in Abhängigkeit von der Stirnplattendicke [mm]

Fließgelenktheorie

Wird die Grenztragfähigkeit der Schrauben unter Berücksichtigung von Abstützkräften erreicht, ist mit steigender Stirnplattendicke kein Zuwachs der Grenztragfähigkeit möglich.

angepasste Fließgelenktheorie

Eine dickere Stirnplatte hat auch im Versagensmodus Schraubenversagen unter Abstützkräften positiven Einfluss auf die Grenztragfähigkeit. Bei verhältnismäßig dicken Platten wird formelbedingt die Grenzzugkraft der Schraube überschritten.

2.3 Einfluss der Schraubenvorspannung

Der Einsatz von vorgespannten Schrauben bei Stirnplattenverbindungen wird schon lange praktiziert. Zwar ist nicht in allen Berechnungsalgorithmen eine Vorspannung erforderlich, sie wird aber in jeglicher Fachliteratur empfohlen. Die Vorteile liegen in der höheren Anfangssteifigkeit, ohne dabei nennenswerte Verluste bei der Tragfähigkeit beklagen zu müssen. Außerdem tritt eine klaffende Fuge erst bei höheren Belastungen auf. Werden geschraubte Stirnplattenstöße dynamisch belastet, ist von nicht vorgespannten Verbindungen gänzlich abzuraten.

Ersatzmodell 1: Platte mit unendlich großen E - Modul

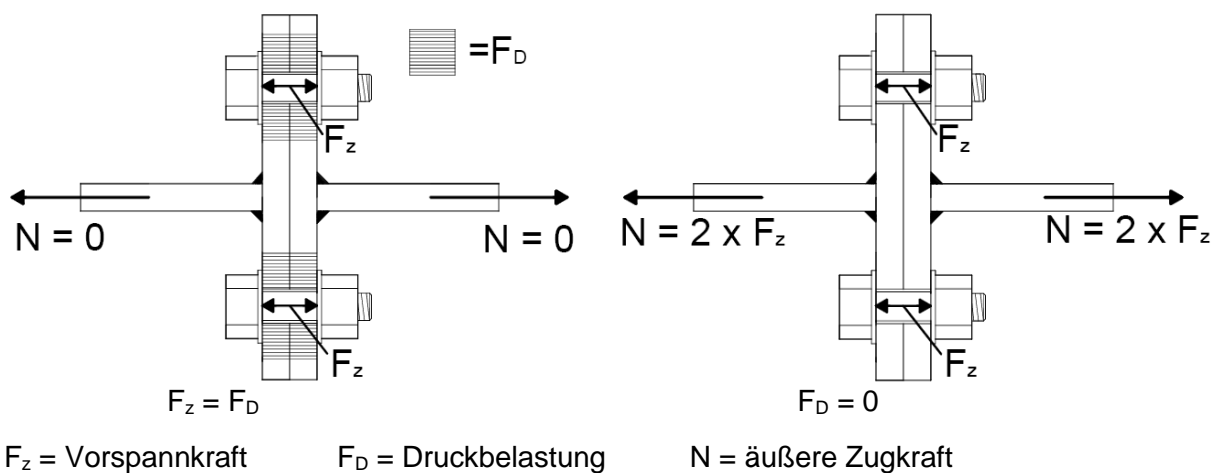


Abb. 7 Einfluss der Vorspannung auf die zugbelastete Schraube

Die Abbildungen zeigen ein T - Stummelmodell mit vorgespannten Schrauben. Die oben dargestellten Zusammenhänge sind nur für ein idealisiertes Modell gültig. Dabei muss von Stirnplatten mit unendlich großen E - Modul ausgegangen werden.

Bei einer äußeren Zugkraft $N = 0$, werden die Stirnplatten aufgrund der Vorspannung zusammengepresst. Erhöht man die Belastung und geht davon aus, dass die Stirnplatten aufgrund des unendlich großen E - Moduls keinerlei Verformungen aufweisen, nimmt die Pressung in den Stirnplatten äquivalent mit der Zugkrafterhöhung ab. Die Schraubenzugkraft bleibt dabei konstant. Ist die äußere Zugkraft gleich der Vorspannkraft, bedeutet dies, dass sich die Schraubenzugkraft bei weiterer Lasterhöhung im gleichen Maße wie die Zugkraft erhöht. Die oben stehende Abbildung zeigt diesen Sachverhalt.

Ersatzmodell 3: Unendlich biegesteife Stirnplatte

Bei einer äußeren Zugkraft $N = 0$, werden die Stirnplatten zusammengepresst und die Schrauben sind aufgrund der Vorspannung gedehnt. Erhöht man die Belastung und geht davon aus, dass die Stirnplatten keine Biegeverformungen aufweisen, nimmt die Pressung in den Stirnplatten ab. Die Schraubenzugkraft erhöht sich im Gegensatz zum Ersatzmodell 1 schon vor dem Erreichen des Punktes „Vorspannkraft = äußere Zugkraft“. Grund hierfür ist, dass Schraube und Platte Federsteifigkeiten besitzen. Somit sind bei Lasterhöhung auch Verformungsänderungen in Dickenrichtung der Stirnplatte vorhanden. Diese Verformungsänderung erfahren auch die Schrauben. Infolgedessen steigt die Schraubenzugkraft. Allerdings ist die Federsteifigkeit der Platten wesentlich höher. Dieser Sachverhalt ist dem unterstehend Diagramm zu entnehmen.

Anmerkung: Die Diagrammgraphen wurden nach dem in der Literatur „Stahlbau“ [2] beschriebenen Verfahren ermittelt. Im Anhang C ist eine Beispielrechnung hinterlegt.

Schraubenzugkraft [kN] in Abhängigkeit zur äußeren einwirkenden Kraft [kN]

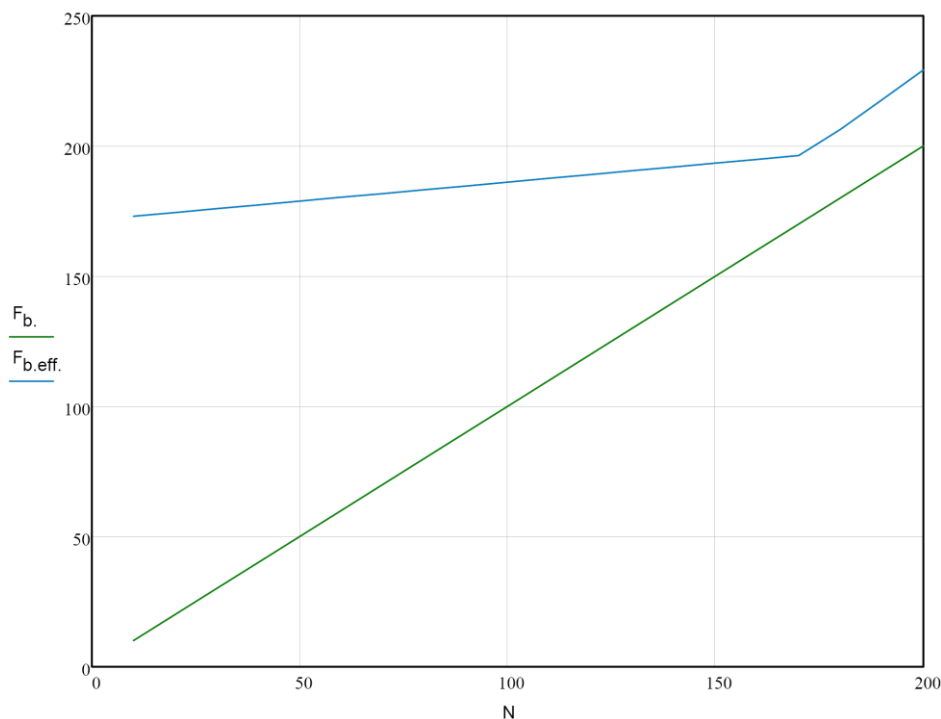


Abb. 8 Belastungsdiagramm einer vorgespannten Schraube

Dabei ist: N = Einwirken äußere Zugkraft je Schraube [kN]

F_b = Schraubenzugkraft ohne Vorspannung [kN]

$F_{b,eff}$ = Schraubenzugkraft mit Vorspannung [kN]

Annahme im Modell 3: Verformbare Stirnplatte (Biegung)

Durch die einwirkende Belastung Verformt sich die Stirnplatte, was Abstützkräfte am Plattenrand zur Folge hat. Diese können zur erheblichen Erhöhung der Schraubenkräfte führen, schon bevor die äußere Zugkraft gleich der Vorspannkraft ist. Insbesondere bei dynamisch beanspruchten Verbindungen sollten die Abstützkräfte die zu einer vergrößerten Spannungsschwingbreite führen beachtet werden. Schrauben weisen im Verhältnis zu ihrer Nennfestigkeit eine äußerst geringe Dauerfestigkeit auf. In der DIN EN 1993-1-9 [C3] wird diese mit 36.8 N/mm^2 angegeben.

2.4 Gefahr von Terrassenbrüchen

Die Gefahr von Terrassenbrüchen entsteht infolge des Auswalzens des Stahles. Vorher punktförmige nichtmetallische Einschlüsse werden somit flächig, Oberflächen parallel ausgewalzt. Die Gefahr von Terrassenbrüchen ist immer dann gegeben, wenn das Grundmaterial quer zur Dickenrichtung beansprucht wird. Dies ist bei Stirnplatten der Fall. Dabei wird der Schaden selten von der einwirkenden Belastung ausgelöst, sondern durch Zugeigenspannungen der Schweißnaht. Somit hat die konstruktive Gestaltung des Anschlusses maßgeblichen Einfluss auf die Terrassenbruchgefahr. Obwohl die Anzahl der Schadensfälle durch Terrassenbrüche seit den 1980 Jahren drastisch zurückgegangen ist, sollte das Thema nicht vernachlässigt werden. Die Abnahme der Schadensfälle liegt darin begründet, dass die Stahlhersteller große Fortschritte bei der Verringerung nichtmetallischer Einschlüsse erzielen konnten (z.B.: Schwefel).

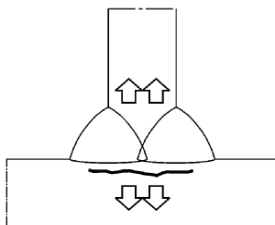


Abb. 9 Terrassenbruch [C4], S.15, Bild 3.1

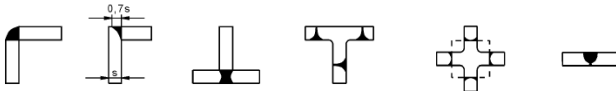



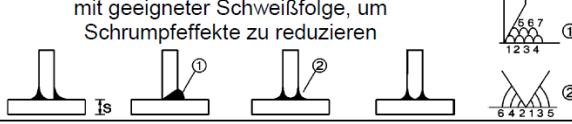
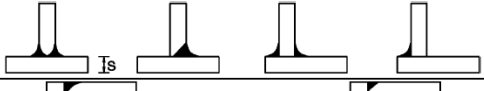

Vermeidung von Terrassenbrüchen

Zur Vermeidung von Terrassenbrüchen stehen zwei Varianten zur Wahl. Entweder wird nach dem Schweißen eine Ultraschalluntersuchung durchgeführt oder es wird ein Stahl mit der benötigten Z-Güte verwendet. Die Z-Güte beschreibt die Brucheinschnürung in Dickenrichtung. Ein Ultraschallgeprüftes dopplungsfreies Blech wie es in der Ausführungsklasse EXC 3 und EXC 4 verlangt wird, ist keine Garantie das nach dem Schweißen keine Terrassenbrüche auftreten. Die Z-Güte kann nach DIN EN 1993-1-10 bestimmt werden. Einflussfaktoren sind Nahtdicke, Nahtform, Dicke des in Querrichtung beanspruchten Bauteils, Behinderung der Schweißnahtschrumpfung und der Einfluss des Vorwärmens. Welches Verfahren zur Anwendung kommt hängt von der Wirtschaftlichkeit ab. Allerdings ist bei ermüdungsbeanspruchten Anschlüssen eine entsprechende Z-Güte einer Ultraschallprüfung vorzuziehen.

Erforderliche Z – Güte

Die Z-Güte definiert sich über eine garantierte Brucheinschnürung in Dickenrichtung. Heutige Stähle erfüllen oftmals auch ohne Bestellung einer Z-Güte, die Anforderung für Güteklasse 15. Ist eine Z-Güte erforderlich, muss diese durch ein Abnahmezeugnis belegt werden. In den meisten Fällen erweist sich eine Z - Güte von 15 oder 25 als ausreichend.

Tabelle 3.2 — Einflüsse auf die Anforderung Z_{Ed}

a)	Schweißnahtdicke, die für die Dehnungsbeanspruchung durch Schweißschrumpfung verantwortlich ist	AC Effektive Schweißnahtdicke a_{eff} , siehe Bild 3.2 AC	AC Nahtdicke bei Kehlnähten AC	Z_i
		$a_{eff} \leq 17 \text{ mm}$	$a = 5 \text{ mm}$	$Z_a = 0$
		$17 < a_{eff} \leq 10 \text{ mm}$	$a = 7 \text{ mm}$	$Z_a = 3$
		$10 < a_{eff} \leq 20 \text{ mm}$	$a = 14 \text{ mm}$	$Z_a = 6$
		$20 < a_{eff} \leq 30 \text{ mm}$	$a = 21 \text{ mm}$	$Z_a = 9$
		$30 < a_{eff} \leq 40 \text{ mm}$	$a = 28 \text{ mm}$	$Z_a = 12$
		$40 < a_{eff} \leq 50 \text{ mm}$	$a = 35 \text{ mm}$	$Z_a = 15$
		$50 < a_{eff}$	$a > 35 \text{ mm}$	$Z_a = 15$
b)	Nahtform und Anordnung der Naht in T-, Kreuz- und Eckverbindungen			$Z_b = -25$
		Eckverbindungen 		$Z_b = -10$
		Einlagige Kehlnahtdicke mit $Z_a = 0$ oder Kehlnähte mit $Z_a > 1$ mit Buttern mit niedrigstem Schweißgut 		$Z_b = -5$
		Mehrlagige Kehlnähte 		$Z_b = 0$
		Voll durchgeschweißte und nicht voll durchgeschweißte Nähte mit geeigneter Schweißfolge, um Schrumpfeffekte zu reduzieren 		$Z_b = 3$
		Voll durchgeschweißte und nicht voll durchgeschweißte Nähte 		$Z_b = 5$
		Eckverbindungen 		$Z_b = 8$
c)	Auswirkung der Werkstoffdicke s auf die lokale Behinderung der Schrumpfung	$s \leq 10 \text{ mm}$		$Z_c = 2^a$
		$10 < s \leq 20 \text{ mm}$		$Z_c = 4^a$
		$20 < s \leq 30 \text{ mm}$		$Z_c = 6^a$
		$30 < s \leq 40 \text{ mm}$		$Z_c = 8^a$
		$40 < s \leq 50 \text{ mm}$		$Z_c = 10^a$
		$50 < s \leq 60 \text{ mm}$		$Z_c = 12^a$
		$60 < s \leq 70 \text{ mm}$		$Z_c = 15^a$
		$70 < s$		$Z_c = 15^a$
d)	Auswirkung der großräumigen Behinderung der Schweißschrumpfung durch andere Bauteile	Schwache Behinderung:	Freie Schrumpfung möglich (z. B. T-Anschlüsse)	$Z_d = 0$
		Mittlere Behinderung:	Freie Schrumpfung behindert (z. B. Querschott in Kastenträgern)	$Z_d = 3$
		Starke Behinderung:	Freie Schrumpfung verhindert (z. B. Längsrippe in orthotroper Fahrbahnplatte)	$Z_d = 5$
e)	Einfluss der Vorwärmung	Ohne Vorwärmung		$Z_e = 0$
		Vorwärmung $\geq 100^\circ\text{C}$		$Z_e = -8$

^a Darf um 50 % reduziert werden, wenn der Werkstoff in Dickenrichtung vorherrschend statisch und nur durch Druckkräfte belastet wird.

Tab. 1 Einflüsse auf die Anforderung Z_{Ed} [C4], S.17, Tabelle 3.2

Erforderliches Z_{Rd}

Tabelle 3.2 — Stahlgütewahl nach EN 10164

Sollwert von Z_{Ed} nach EN 1993-1-10	Erforderliche Qualität Z_{Rd} nach den Z-Werten nach EN 10164
$Z_{Ed} \leq 10$	—
$10 < Z_{Ed} \leq 20$	Z 15
$20 < Z_{Ed} \leq 30$	Z 25
$Z_{Ed} > 30$	Z 35

Tab. 2 Stahlgütewahl nach EN 10164 [C1], S.29, Tabelle 3.2

Hinweis

Unter Kapitel 3.2 (S. 39) ist eine Beispielrechnung für die Ermittlung der erforderlichen Z - Güte zu finden.

3. Zweireihige Stirnplattenverbindungen am Doppel-T-Träger

3.1 Beschreibung von Berechnungsverfahren

Im Kapitel 3.1 werden die Berechnungsverfahren nach DIN 18800 und DIN EN 1993-1-8 erläutert. Dabei wird für das Berechnungsverfahren nach DIN 18800 auf bündige und überstehende Stirnplatten eingegangen. Die Beschreibung für den Berechnungsalgorithmus nach DIN EN 1993-1-8 orientiert sich nicht an einem bestimmten Schraubenbild, sondern ist allgemein gehalten.

3.1.1 Bemessungsverfahren nach DIN 18800 für überstehende Stirnplatten

Vorbemerkung

In der DIN 18800 [C5] wird kein explizites Berechnungsverfahren für Stirnplattenverbindungen beschrieben. Es wird auf das 1982 von der Stahlbau-Verlags-GmbH Köln veröffentlichte „Stahlbauhandbuch“ [4] verwiesen. Die hier aufgeführte Beschreibung des Berechnungsverfahrens orientiert sich an „Stahlbau 2“ [2]. Die Ergebniswerte der aufgeführten Berechnung stimmen mit dem DSTV Ringbuch [11] überein. Im Anhang D ist eine Beispielrechnung des Berechnungsverfahrens zu finden.

Voraussetzungen

1. $\frac{I_{\text{Steg}}}{I_{\text{gesamt}}} \leq 0,15$ Diese Bedingung ist bei allen genormten Walzträgern erfüllt.
2. Scherfuge im Schraubenschaft
3. Stahlgüte S 235
4. Die einwirkende Zugkraft darf bis zu 10% der plastischen Tragfähigkeit des angeschlossenen Profils vernachlässigt werden.
5. Es sind vorgespannte Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 zu verwenden.

Berechnungsvariablen

Träger/ Stirnplatte

M_{Ed} = einwirkendes Moment

d_p = Stirnplattendicke

b_p = Stirnplattenbreite

h_t = Profilhöhe

b_t = Profilbreite

t_t = Flanschdicke

a_f = Kehlnahtdicke am Flansch

a_s = Kehlnahtdicke am Steg

f_y = charakteristische Streckgrenze

$\gamma_M = 1,1$ (Teilsicherheitsbeiwert)

Schraube

A = Schaftquerschnitt der Schraube

A_{Sp} = Spannungsquerschnitt der Schraube

D = Durchmesser der Unterlegscheibe

$f_{y.B}$ = charakteristische Streckgrenze

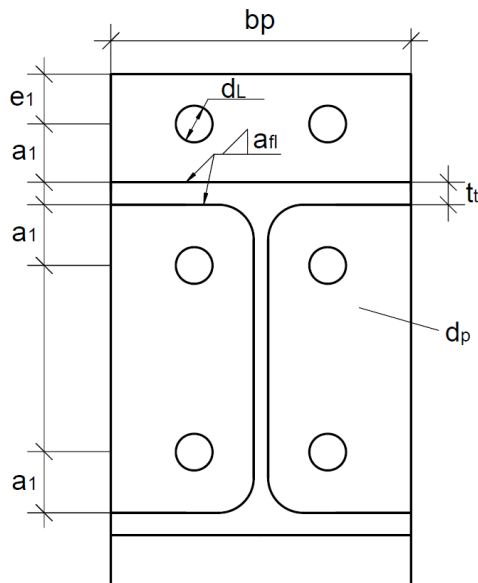
$f_{u.B}$ = charakteristische Zugfestigkeit

d_L = Lochdurchmesser

$\gamma_M = 1,1$ (Teilsicherheitsbeiwert)

Ermittlung der Flanschzugkraft

Geometrieübersicht



Für die Berechnung wird der Hebelarm a_1 angepasst. Dabei werden die Schweißnahtdicke, die Plattendicke und der Unterlegscheibendurchmesser berücksichtigt.

Berechnungshebelarm c_1

$$c_1 := a_1 - \frac{a_{fl} \cdot \sqrt{2}}{3} - \frac{(D + d_p)}{4}$$

Abb. 10 Geometrieübersicht

Plastische Widerstandsmomente der Stirnplatte

Plastisches Widerstandsmoment in der Flanschebene

$$M_{1,pl.d} := \frac{1.1 \sigma_{Rd} \cdot b_p \cdot d_p^2}{4}$$

Plastisches Widerstandsmoment in der Schraubenebene

$$M_{2,pl.d} := \frac{1.1 \sigma_{Rd} \cdot (b_p - n \cdot d_L) \cdot d_p^2}{4}$$

Bemessungs Streckgrenze $\sigma_{Rd} := \frac{f_y}{\gamma_M}$

Für die Ermittlung der Flanschzugkraft werden 4 Versagensmechanismen untersucht.

1. Versagensmodus a = Schraubenversagen unter Abstützkräften
2. Versagensmodus b = Plattenversagen
3. Versagensmodus c = Schraubennachweis ohne Abstützkräfte
4. Versagensmodus d = Querkraftbeanspruchbarkeit der Stirnplatte

Versagensmodus a = Schraubenversagen unter Abstützkräften

Im Versagensmodus a wird das Schraubenversagen unter Berücksichtigung der Abstützkräfte K untersucht. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Stirnplatte am Trägerflansch ein Fließgelenk ausbildet. Die Abstützkräfte führen zu einer Erhöhung der Schraubenkraft.

Grenzzugkraft der Schrauben nach DIN 18800

$$N_{R,d} := \min \left(\frac{A_{Sp} \cdot f_{u,B}}{1,25 \cdot \gamma_M}, \frac{A \cdot f_{y,B}}{1,1 \cdot \gamma_M} \right)$$

Schraubenversagen unter Abstützkräften

$$Z_{t,a} := \frac{2}{e_1 + c_1} \cdot (n \cdot N_{R,d} \cdot e_1 + M_{1,pl,d})$$

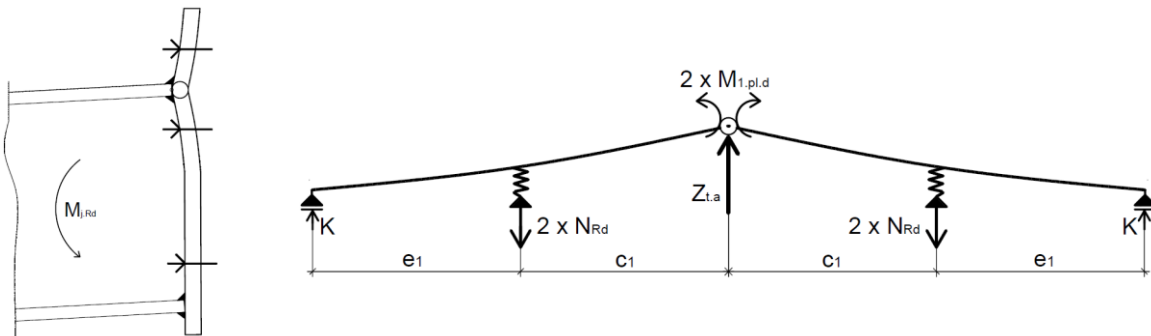


Abb. 11 Statisches Ersatzmodell für den Versagensmodus Schraubenversagen unter Abstützkräften

Versagensmodus b = Plattenversagen

Im theoretischen Versagensmodus b versagt die Stirnplatte. Dieser Versagensmodus stellt vor allem die Gebrauchstauglichkeit der Verbindung sicher. Aufgrund des plastischen Umformvermögens der Stirnplatte ist ein Versagen dieser nicht üblich. Im Regelfall versagt die Schraubenverbindung. Bis zum Versagen der Schraubenverbindung verformt sich die Stirnplatte plastisch, was große Verformungen zur Folge hat.

$$Z_{t,b} := 2 \cdot \frac{(M_{1,pl,d} + M_{2,pl,d})}{c_1}$$

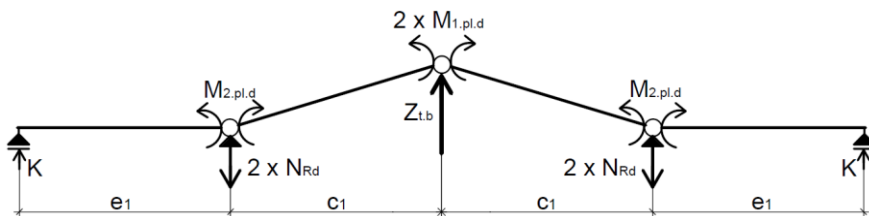


Abb. 12 Statisches Ersatzmodell für den Versagensmodus Plattenversagen

Versagensmodus c = Schraubenversagen ohne Abstützkräfte

Versagensmechanismus c tritt bei verhältnismäßig dicken Stirnplatten auf. Es handelt sich um reines Schraubenversagen ohne Abstützkräfte. Dieser Modus wird notwendig da im Modus a formelbedingt Grenzzugkräfte ermittelt werden können, die über der Grenzzugkraft der Schrauben liegen.

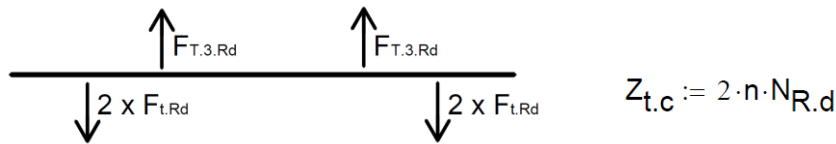


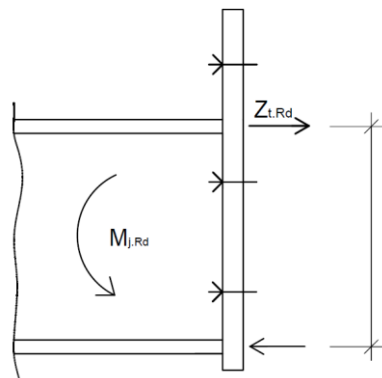
Abb. 13 Statisches Ersatzmodell für den Versagensmodus Schraubenversagen ohne Abstützkräfte

Versagensmodus d = Versagen der querkraftbeanspruchten Stirnplatte

$$Z_{t,d} := 2 \cdot \left(b_p \cdot d_p \cdot \frac{\sigma_{Rd}}{\sqrt{3}} \right)$$

Maßgebende Grenzzugkraft

$$Z_{t,Rd} := \min(Z_{t,a}, Z_{t,b}, Z_{t,c}, Z_{t,d}) \quad \text{Die kleinste Flanschezugkraft wird maßgebend!}$$

Momententragfähigkeit

$$M_{y,Rd} := Z_{t,Rd} \cdot (h_t - t_t)$$

Abb. 14 Darstellung des Hebelarms für die Berechnung der Momententragfähigkeit

3.1.2 Bemessungsverfahren nach DIN 18800 für bündige Stirnplatten

Vorbemerkung

In der DIN 18800 [C5] wird kein explizites Berechnungsverfahren für Stirnplattenverbindungen beschrieben. Es wird auf das 1982 von der Stahlbau-Verlags-GmbH Köln veröffentlichte Stahlbauhandbuch [4] verwiesen. In [4] wird aber nur auf Berechnungsverfahren für überstehende Stirnplatten näher eingegangen. Berechnungsalgorithmen für bündige Stirnplatten sind in „Stahlbau 2“ [2] und „Stahlbau nach DIN 18800 (11.90)“ [5] zu finden. Die hier aufgeführte Beschreibung des Berechnungsverfahrens orientiert sich an [5]. Es wird aber eine alternative Schreibweise gewählt, um die Versagensmechanismen anschaulich darstellen zu können. Die Ergebniswerte der aufgeführten Berechnung und der Berechnung aus [5] weichen für bestimmte Geometrien vom DSTV Ringbuch ab. Die Gründe dafür werden auf Seite 19 erläutert. Im Anhang E ist eine Beispielrechnung des Berechnungsverfahrens zu finden.

Voraussetzungen

1. $\frac{I_{\text{Steg}}}{I_{\text{gesamt}}} \leq 0.15$ Diese Bedingung ist bei allen genormten Walzträgern erfüllt.
2. Scherfuge im Schraubenschaft
3. Stahlgüte S 235
4. Die einwirkende Zugkraft darf bis zu 10% der plastischen Tragfähigkeit des angeschlossenen Profils vernachlässigt werden.
5. Es sind vorgespannte Schraubenverbindungen der Festigkeitsklasse 10.9 zu verwenden (SLV – Verbindung).

Berechnungsvariablen

Träger/ Stirnplatte

M_{Ed} = einwirkendes Moment
 d_p = Stirnplattendicke
 b_p = Stirnplattenbreite
 h_t = Profilhöhe
 b_t = Profilbreite
 t_t = Flanschdicke
 a_f = Kehlnahtdicke am Flansch
 a_s = Kehlnahtdicke am Steg
 $f_{y,k}$ = charakteristische Streckgrenze
 γ_M = 1,1 (Teilsicherheitsbeiwert)

Schraube

A = Schaftquerschnitt der Schraube
 A_{Sp} = Spannungsquerschnitt der Schraube
 D = Durchmesser der Unterlegscheibe
 $f_{y,B}$ = charakteristische Streckgrenze
 $f_{u,B}$ = charakteristische Zugfestigkeit
 d_L = Lochdurchmesser
 γ_M = 1,1 (Teilsicherheitsbeiwert)

Hinweis

Mit diesem Berechnungsalgorithmus werden keine Grenztragfähigkeiten ermittelt, sondern die Auslastungen der einzelnen Komponenten bei der vorherrschenden Belastung.

Einwirkende Flanschzugkraft

Im Berechnungsverfahren wird davon ausgegangen, dass der Momentenabtrag ausschließlich über die Gurte stattfindet.

$$Z_{Ed} := \frac{M_{Ed}}{(h_t - t_t)}$$

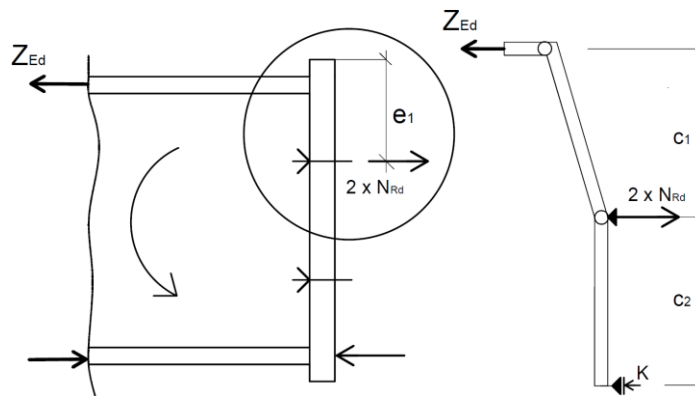
Übersicht über Ersatzmodell und Hebelarme

Abb. 15 Übersicht über das Ersatzmodell und die Hebelarme

Die Berechnungshebelarme c_1 und c_2 berücksichtigen die Stirnplattendicke und den Unterlegscheibendurchmesser.

$$c_1 := e_1 - \ddot{u} - t_t - \frac{\left(\frac{D}{2} + d_p\right)}{2} \quad c_2 := \frac{D}{2} + d_p$$

Ermittlung der AuslastungenÜberprüfung der Zugflanschbeanspruchung

$$\eta_1 := \frac{Z_{Ed}}{f_{y,d} \cdot b_t \cdot t_t} \quad f_{y,d} := \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$$

Überprüfung der Querkraftbeanspruchung infolge Flanschzugkraft

$$\eta_2 := \frac{Z_{Ed}}{\left[\left(\frac{f_{y,d}}{\sqrt{3}}\right) \cdot b_p \cdot d_p\right]}$$

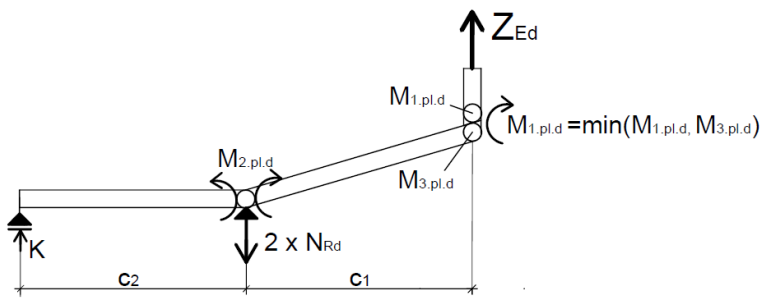
Überprüfung des Plattenmomentes in Schraubenebenen ($M_{2,pl,d}$)

Abb. 16 Ersatzmodell für den Versagensmodus Plattenversagen

Ermittlung des plastischen Widerstandsmomentes $M_{l,pl}$ unter Berücksichtigung der einwirkenden Flanschzugkraft

Faktor zur Minderung des plastischen Flanschwiderstandsmomentes unter Berücksichtigung der einwirkenden Flanschzugkraft.

$$\nu := 1 - \left(\frac{Z_{Ed}}{f_{y,d} \cdot b_t \cdot t_t} \right)^2$$

Für die Ermittlung des plastischen Widerstandsmomentes $M_{l,pl}$ werden zwei Versagensszenarien untersucht.

Fall 1: Versagen des Zugflansches

$$M_{I,pl} := 1.1 \cdot f_{y,d} \cdot b_t \cdot \frac{t_t^2}{4} \cdot \nu$$

Fall 2: Versagen der Stirnplatte

$$M_{III,pl} := 1.1 \cdot f_{y,d} \cdot b_p \cdot \frac{d_p^2}{4}$$

Das kleinere Widerstandsmoment wird maßgebend!

$$M_{l,pl} := \min(M_{I,pl}, M_{III,pl})$$

Auslastung der Stirnplatten in Schraubenebenen

Einwirkendes Moment

$$M_{II} := Z_{Ed} \cdot (c_1) - M_{l,pl}$$

Widerstandsmoment

$$M_{II,pl} := 1.1 \cdot f_{y,d} \cdot (b_p - n_z \cdot d_L) \cdot \frac{d_p^2}{4}$$

Auslastung $\eta_3 := \frac{M_{II}}{M_{II,pl}}$

Überprüfung des Versagenskriteriums 4

Einwirkendes Moment

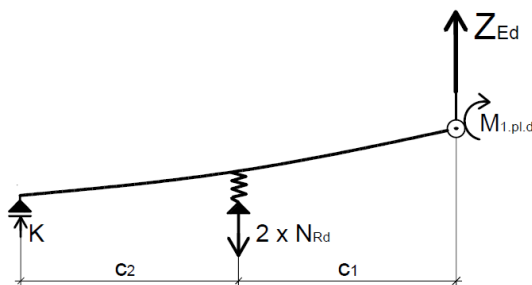
Widerstandsmoment

Auslastung

$$M_{II} := Z_{Ed} \cdot (c_1) - M_{I,pl}$$

$$M_{II,Q,Rd} := \left(\frac{f_{y,d}}{\sqrt{3}} \right) \cdot b_p \cdot d_p \cdot c_2$$

$$\eta_4 := \frac{M_{II}}{M_{II,Q,Rd}}$$

Überprüfung der Schraubenkraft unter Abstützkräften

Abstützkraft K

$$K := \frac{1}{c_2} \cdot (c_1 \cdot Z_{Ed} - M_{I,pl})$$

Abb. 17 Ersatzmodell für den Versagensmodus Schraubenversagen unter Abstützkräften

Einwirkende Schraubenkraft

Grenzzugkraft der Schrauben nach DIN 18800

$$N_{Ed,K} := \frac{Z_{Ed} + K}{n_z}$$

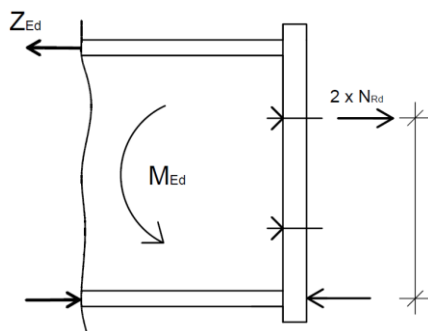
$$N_{R,d} := \min \left(\frac{A_{Sp} \cdot f_{u,B}}{1.25 \cdot \gamma_M}, \frac{A \cdot f_{y,B}}{1.1 \cdot \gamma_M} \right)$$

Auslastung

$$\eta_5 := \frac{N_{Ed,K}}{N_{R,d}}$$

Überprüfung der Schraubenkraft ohne Abstützkräfte

Die Tragfähigkeiten die im DSTV Ringbuch [11] angegeben werden, lassen den Schluss zu das kein separater Schraubennachweis geführt wurde. Im Vergleich mit einem herkömmlichen Schraubennachweis (Abb. 18) führt dies dazu, dass die Tragfähigkeiten speziell bei verhältnismäßig dicken Stirnplatten überschätzt werden.



$$N_{Ed} := \frac{0.5 M_{Ed}}{\left(h_t - e_1 - \frac{t_t}{2} + \ddot{u} \right)}$$

$$\text{Auslastung } \eta_6 := \frac{N_{Ed}}{N_{R,d}}$$

Abb. 18 Hebelarm für den Versagensmodus Schraubenversagen ohne Abstützkräfte

Die höchste Auslastung wird maßgebend! $\eta_{\max} := \max(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6) < 100 \%$

3.1.3 Bemessungsverfahren nach DIN EN 1993-1-8

Vorbemerkung

Die im Jahre 2012 eingeführte Berechnungsnorm DIN EN 1993-1-8 beinhaltet auch ein neues Bemessungsverfahren für Stirnplattenanschlüsse. Explizit werden in der Norm überstehende und bündige Doppel-T-Stirnplattenverbindungen mit zweireihigen Schraubenbild behandelt. Das Berechnungsmodell basiert auf einem Komponentenmodell, welches die Schraubenreihen je nach Aussteifungseinfluss des Trägers einzeln untersucht. Darüber hinaus werden weitere Versagenskriterien wie zum Beispiel das Versagen des Druckflansches untersucht. In den Anhängen F und G sind Beispielrechnungen an überstehenden und bündigen Anschlussvarianten hinterlegt. Die Beispielrechnung in Anhang G orientiert sich an dem aktuellen Ringbuch [13].

Geometrie, Bedingungen und Berechnungsvorwerte

Grundbedingungen

1. Der Schraubenabstand w darf maximal der Trägerbreite entsprechen (Abb. 20)
2. Die Schweißnaht sollte nicht die höchst ausgelastete Verbindungskomponente sein
3. Es sind Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 und 10.9 zu verwenden.
4. Eine Normalkraftbeanspruchung die unter 5% der plastischen Querschnittstragfähigkeit liegt, kann vernachlässigt werden.

Berechnungsvariablen

Stirnplatte

t_p = Stirnplattendicke
 b_p = Stirnplattenbreite
 f_y = Streckgrenze der Stirnplatte

Schrauben

A_s = Spannungsquerschnitt
 $f_{u,b}$ = Zugfestigkeit
 k_2 = Beiwert
 γ_{M2} = 1,25 (Sicherheitsbeiwert)
 d_0 = Lochdurchmesser
 r_x = Nummer der Schraubenreihe

Profil

h = Profilhöhe
 b = Profilbreite
 t_f = Flanschdicke
 t_w = Stegdicke

$M_{c,Rd}$ = Momentenbeanspruchbarkeit

Schweißnaht

a_f = Flanschnahtdicke
 a_s = Steгнаhtdicke

Grenzzugkraft der Schraube nach EC 3

$$F_{t,Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{u,b} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

Geometriedefinition im nicht aussteiften Bereich

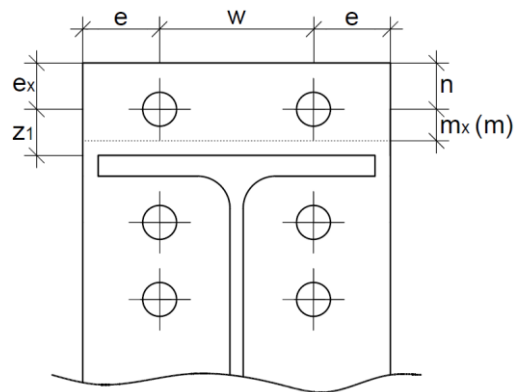


Abb. 20 Geometriedefinition im nicht aussteiften Bereich

Geometriedefinition im aussteiften Bereich

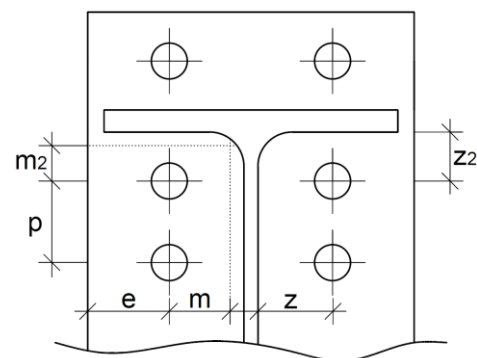


Abb. 21 Geometriedefinition im aussteiften Bereich

Für die Berechnung werden die Hebelarme z , z_1 und z_2 angepasst. Dabei wird die Schweißnahtdicke berücksichtigt. Bemessungshebelarme sind m , m_x und m_2 .

Bemessungshebelarme

$$m := z - 0.8 \cdot a_S \cdot \sqrt{2}$$

$$m_x := z_1 - 0.8 \cdot a_G \cdot \sqrt{2}$$

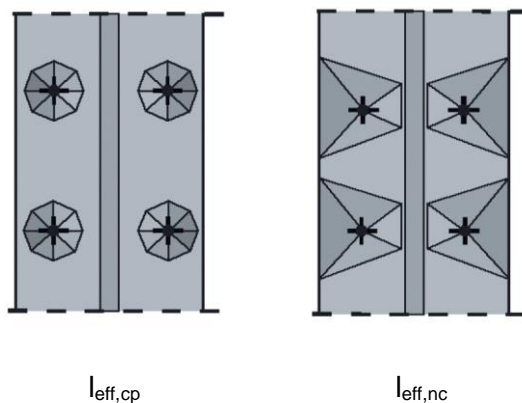
$$m_2 := z_2 - 0.8 \cdot a_G \cdot \sqrt{2}$$

Effektive Einflussbreite der Stirnplatte

Im EC 3 wird für jede Schraube eine rechnerische Einflussbreite ermittelt. Diese muss nicht mit der geometrischen Breite übereinstimmen.

Darstellung der effektiven Einflussbreiten

Schraubenreihe einzeln betrachtet



Schraubenreihe als Teil einer Gruppe von Schraubenreihen

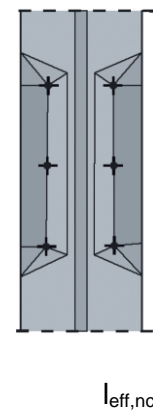
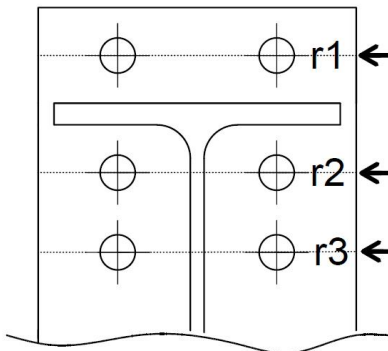


Abb. 22 Auszug aus Bild 5 Fließmuster für T-Stummel [16], S. 3, Bild 5

Effektive Längen der Schraubenreihen



Lage der Schraubenreihe	Schraubenreihe einzeln betrachtet		Schraubenreihe als Teil einer Gruppe von Schraubenreihen	
	Kreisförmiges Muster $l_{\text{eff,cp}}$	Nicht kreisförmiges Muster $l_{\text{eff,nc}}$	Kreisförmiges Muster $l_{\text{eff,cp}}$	Nicht kreisförmiges Muster $l_{\text{eff,nc}}$
Äußere Schraubenreihe neben Trägerzugflansch r1	der kleinste Wert von: $2\pi m_x$ $\pi m_x + w$ $\pi m_x + 2e$	der kleinste Wert von: $4m_x + 1,25e_x$ $e + 2m_x + 0,625e_x$ $0,5b_p$ $0,5w + 2m_x + 0,625e_x$	—	—
Innere Schraubenreihe neben Trägerzugflansch r2	$2\pi m$	cm	$\pi m + p$	$0,5p + cm$ $-(2m + 0,625e)$
Andere innere Schraubenreihe r3	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p

Abb. 23 Lage der Schraubenreihen

Tab. 3 Auszug aus Tabelle 6.6 Wirksame Längen für Stirnbleche [C2], S. 90, Tabelle 6.6

Eine Gruppenbetrachtung der Schraubenreihen kann unter Einhaltung der folgenden zwei Bedingungen entfallen.

1. Die Normalkraftbeanspruchung liegt unter 5% der plastischen Querschnittstragfähigkeit
2. Es wird nur eine innere Schraubenreihe rechnerisch angesetzt

Werden für eine momentenbeanspruchte Verbindung mehrere innenliegende Schraubenreihen rechnerisch angesetzt muss ein Gruppenversagen berücksichtigt werden, auch wenn die Normalkraftbeanspruchbarkeit unter 5% der plastischen Querschnittstragfähigkeit liegt.

Effektive Einflusslängen je Schraube

$$l_{\text{eff},1} := \text{wenn}(l_{\text{eff,nc}} \leq l_{\text{eff,cp}}, l_{\text{eff,nc}}, l_{\text{eff,cp}}) \quad l_{\text{eff},2} := l_{\text{eff,nc}}$$

Ermittlung der plastischen Widerstandsmomente der Stirnplatte

$$M_{\text{pl},1.\text{Rd}} := 0,25 \cdot t_p^2 \cdot l_{\text{eff},1} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M0}} \quad M_{\text{pl},2.\text{Rd}} := 0,25 \cdot t_p^2 \cdot l_{\text{eff},2} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M0}}$$

Die plastischen Widerstandsmomente beziehen sich auf die halbe Plattenbreite.

Berechnung der Tragfähigkeit der Schraubenreihe r1

Vorbemerkung zur Überprüfung auf Abstützkkräfte

Das Berechnungsverfahren nach EC 3 sieht eine Voruntersuchung auf Abstützkkräfte vor. Bei Anschlüssen mit dicken Stirnplatten und/oder kleinem Flansch – Schraubenabstand wird in der Voruntersuchung häufig festgestellt dass keine Abstützkkräfte vorhanden sind. Dem entgegen steht die Formulierung „Bei geschraubten Träger-Stützenanschlüssen oder Trägerstößen kann damit gerechnet werden, dass Abstützkkräfte auftreten“ (Din EN 1993-1-8 S.75 [C2]). Bei Vergleichen gegen die Bemessungstabellen „Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau nach DIN EN 1993-1-8“ [13] wurde festgestellt, dass ein Ausfall der Abstützkkräfte unberücksichtigt bleibt. Da es sich beim Ringbuch [13] um eine statisch geprüfte Beanspruchungstabelle handelt, wird die Beispielrechnungen im Kapitel 3.2 und die Gegenüberstellungen im Kapitel 3.3 ohne Voruntersuchung auf Abstützkkräfte geführt. In der folgenden Beschreibung des Berechnungsverfahrens wird eine Voruntersuchung auf Abstützkkräfte der Vollständigkeit halber mit aufgeführt. Allgemein ist zu sagen, dass ein ausbleiben der Abstützkkräfte eine Verringerung der Schraubenzugkräfte und eine stärkere Beanspruchung der Stirnplatte bewirkt. Die rechnerischen Tragfähigkeiten sind geringer.

Vergleichsrechnungen gegen die EDV Programme Frilo.System.Next und Harzer-Statik-Software haben folgendes ergeben.

Frilo.System.Next: Eine Voruntersuchung auf Ausfall von Abstützkkräften wird berücksichtigt.

Harzer-Statik-Software: Abstützkkräfte sind immer vorhanden

Überprüfung auf Abstützkkräfte

$$L_{b.} := t_p \cdot 2 + 0.5(m_h + k) + 2 \cdot s_h = 7.25 \cdot \text{cm} \quad \leq \quad L_{bS.} := \frac{8.8 \cdot m^3 \cdot A_s \cdot 1}{l_{\text{eff.1.}} \cdot t_p^3}$$

Ist L_b kleiner L_{bS} treten Abstützkkräfte auf.

Dabei ergibt sich L_b aus der Klemmlänge der Schraube, der 2 fachen Unterlegscheibendicke, der halben Mutterhöhe und der halben Schraubenkopfhöhe.

Grenzzugkraft der Flansche

Die Berechnung der Grenzzugkraft erfolgt mit angepassten Hebelarmen (m , n). Der Berechnungshebelarm darf nicht größer als $1,25 \times m$ sein.

$$m := m_x \quad n := \text{wenn}(e_x \leq 1.25 \cdot m_x, e_x, 1.25 \cdot m_x)$$

Versagensmodus 1

Im theoretischen Versagensmodus 1 versagt die Stirnplatte. Dieser Versagensmodus stellt vor allen die Gebrauchstauglichkeit der Verbindung sicher. Aufgrund des plastischen Umformvermögens der Stirnplatte ist ein Versagen dieser nicht üblich. Im Regelfall versagt die Schraubenverbindung. Bis zum Versagen der Schraubenverbindung verformt sich die Stirnplatte plastisch was große Verformungen zur Folge hat.

Abstützkräfte vorhanden

Die Stirnplatte bildet Fließgelenke im Flanschbereich und in der Schraubenebene aus.

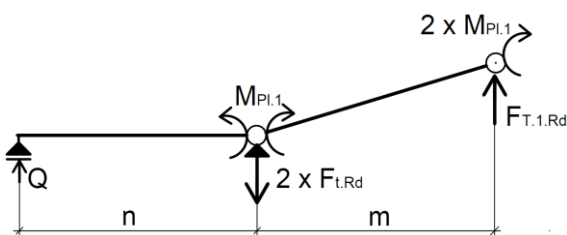


Abb. 24 Statisches Ersatzmodell im Versagensmodus Plattenversagen mit Abstützkräften

$$F_{T,1,Rd} := \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m}$$

Q = Abstützkraft

$F_{t,Rd}$ = Grenzzugkraft Schraube

$F_{T,Rd1}$ = Grenzzugkraft Flansch

keine Abstützkräfte

Die Stirnplatte bildet nur ein Fließgelenk im Flanschbereich aus.

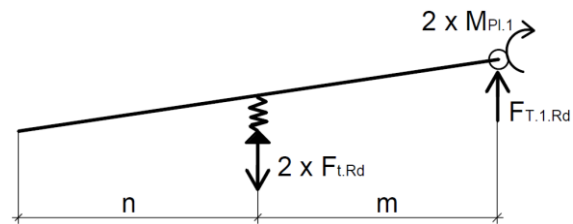
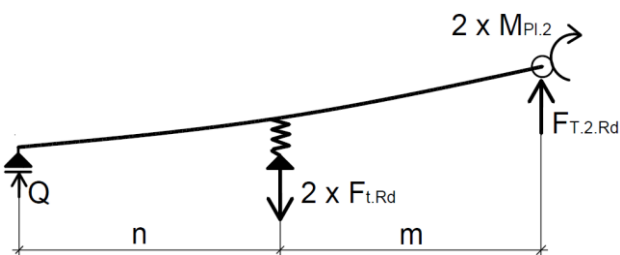


Abb. 25 Statisches Ersatzmodell im Versagensmodus Plattenversagen ohne Abstützkräften

$$F_{T,1,Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m}$$

Versagensmodus 2

Im Versagensmechanismus 2 wird das Schraubenversagen unter Berücksichtigung der Abstützkräfte Q untersucht. Dabei wird davon ausgegangen das die Stirnplatte am Trägerflansch ein Fließgelenk ausbildet. Die Abstützkräfte führen zu einer Erhöhung der Schraubenkraft. Falls keine Abstützkräfte vorhanden sind, besitzt dieser Versagensmodus keine Relevanz und wird vom Modus 1 mit abgedeckt.

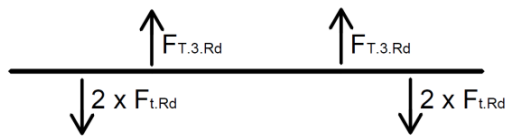


$$F_{T,2,Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n \cdot 2 \cdot F_{t,Rd}}{m + n}$$

$F_{t,Rd}$ = Grenzzugkraft der Schraube

Abb. 26 Statisches Ersatzmodell im Versagensmodus Schraubenversagen mit Abstützkräften

Versagensmodus 3



$$F_{T.3.Rd} := 2 \cdot F_{t.Rd}$$

Versagensmechanismus 3 tritt bei verhältnismäßig dicken Stirnplatten auf. Es handelt sich um reines Schraubenversagen ohne Abstützkräfte. Dieser Modus wird notwendig da im Modus 2 formelbedingt Grenzzugkräfte ermittelt werden können, die über der Grenzzugkraft der Schrauben liegen.

Abb. 27 Statisches Ersatzmodell im Versagensmodus Schraubenversagen ohne Abstützkräften

Zulässige Flanschzugkraft

Die kleinste Grenzzugkraft wird maßgebend! $F_{Rd.1} := \min(F_{T.1.Rd.}, F_{T.2.Rd.}, F_{T.3.Rd.})$

Berechnung der Tragfähigkeit der Schraubenreihe r2

Die Schraubenreihe 2 wird zusätzlich vom Steg des Trägers ausgesteift. Aus diesen Grund ermittelt sich die effektive Einflussbreite mithilfe der Tabelle 5, mit der die aussteifende Wirkung des Trägerstegs berücksichtigt wird.

Lage der Schraubenreihe	Schraubenreihe einzeln betrachtet		Schraubenreihe als Teil einer Gruppe von Schraubenreihen	
	Kreisförmiges Muster $l_{eff,cp}$	Nicht kreisförmiges Muster $l_{eff,nc}$	Kreisförmiges Muster $l_{eff,cp}$	Nicht kreisförmiges Muster $l_{eff,nc}$
Innere Schraubenreihe neben Trägerzugflansch	$2\pi m$	cm	$\pi m + p$	$0,5p + cm$ $-(2m + 0,625e)$

Abb. 28 Lage der Schraubenreihe

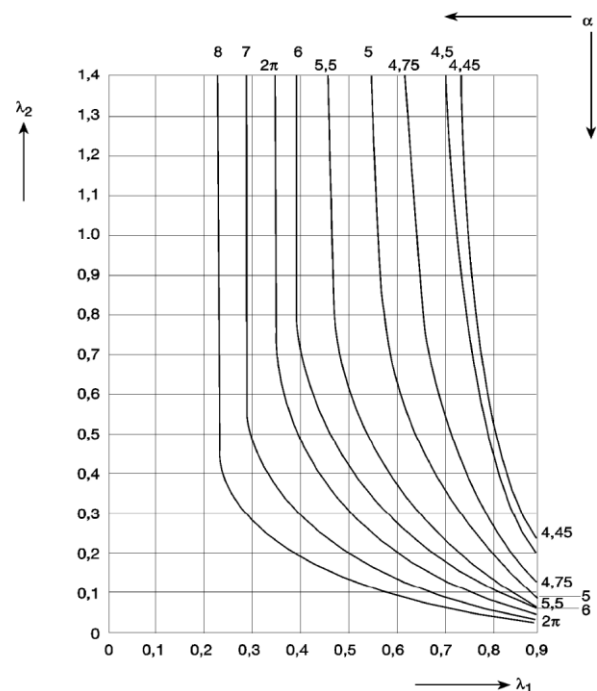
Tab. 4 Auszug aus Tabelle 6.6 Wirksame Längen für Stirnbleche [C2], S. 90, Tabelle 6.6

$$\lambda_1 := \frac{m}{m + e}$$

$$\lambda_2 := \frac{m_2}{m + e}$$

$$l_{eff.1} := \text{wenn}(l_{eff.nc} \leq l_{eff.cp}, l_{eff.nc}, l_{eff.cp})$$

$$l_{eff.2} := l_{eff.nc}$$



Tab. 5 Wirksame Längen für Stirnbleche [C2], S. 91, Bild 6.11

Plastische Widerstandsmomente der Stirnplatte

$$M_{pl.1.Rd} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot l_{eff.1} \cdot \frac{f_{y.k}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl.2.Rd} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot l_{eff.2} \cdot \frac{f_{y.k}}{\gamma_{M0}}$$

Überprüfung auf Abstützkräfte

$$L_{b.} := t_p \cdot 2 + 0.5(m_h + k) + 2 \cdot s_h = 7.25 \cdot \text{cm} \quad \leq \quad L_{bS.} := \frac{8.8 \cdot m^3 \cdot A_s \cdot 1}{l_{eff.1} \cdot t_p^3}$$

Ist L_b kleiner L_{bS} treten Abstützkräfte auf.

Grenzzugkraft der Flansche

Berechnungshebelarm n

$$n := \text{wenn}(e_x \leq 1.25 \cdot m, e_x, 1.25 \cdot m)$$

Versagensmodus 1 (Plattenversagen)

Abstützkräfte vorhanden

$$F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{pl.1.Rd}}{m}$$

keine Abstützkräfte

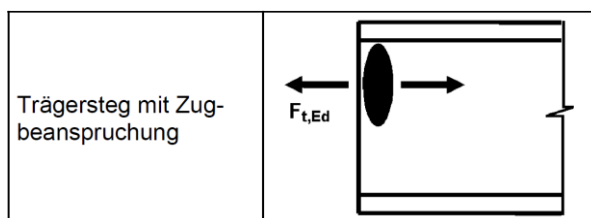
$$F_{T.1.Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl.1.Rd}}{m}$$

Versagensmodus 2 (Schraubenversagen unter Abstützkräften)

$$F_{T.2.Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl.2.Rd} + n_s \cdot n \cdot F_{t.Rd}}{m + n}$$

Versagensmodus 3 (Schraubenversagen ohne Abstützkräfte)

$$F_{T.3.Rd} := 2 \cdot F_{t.Rd}$$

Versagen des Trägerstegs

$$F_{t.wb.Rd} := l_{eff.1} \cdot t_w \cdot \frac{f_{y.k}}{\gamma_{M0}}$$

Abb. 29 Auszug aus Tabelle 6.1 Grundkomponenten der Anschlüsse [C2] S.67, Tabelle 6.1

Zulässige Flanschzugkraft

Die kleinste Grenzzugkraft wird maßgebend! $F_{Rd.2} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}, F_{t.wb.Rd})$

Berechnung der Tragfähigkeit der Schraubenreihe 3

Ermittlung der Einflussbreite



Lage der Schraubenreihe	Schraubenreihe einzeln betrachtet		Schraubenreihe als Teil einer Gruppe von Schraubenreihen	
	Kreisförmiges Muster $l_{eff,ep}$	Nicht kreisförmiges Muster $l_{eff,ac}$	Kreisförmiges Muster $l_{eff,ep}$	Nicht kreisförmiges Muster $l_{eff,ac}$
Andere innere Schraubenreihe	$2\pi m$	$4m + 1,25 e$	$2p$	p

Abb. 30 Lage der Schraubenreihe

Tab. 6 Auszug aus Tabelle 6.6 Wirksame Längen für Stirnbleche [C2], S. 90, Tabelle 6.6

Plastische Widerstandsmomente der Stirnplatte

$$M_{pl.1.Rd} := 0,25 \cdot t_p^2 \cdot l_{eff.1} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl.2.Rd} := 0,25 \cdot t_p^2 \cdot l_{eff.2} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M0}}$$

Überprüfung auf Abstützkräfte

$$L_{b.} := t_p \cdot 2 + 0,5(m_h + k) + 2 \cdot s_h = 7,25 \cdot \text{cm} \leq L_{bS.} := \frac{8,8 \cdot m^3 \cdot A_s \cdot 1}{l_{eff.1} \cdot t_p^3}$$

Grenzzugkraft der Flansche

Versagensmodus 1

Abstützkräfte vorhanden

$$F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{pl.1.Rd}}{m}$$

keine Abstützkräfte vorhanden

$$F_{T.1.Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl.1.Rd}}{m}$$

Versagensmodus 2

$$F_{T.2.Rd} := \frac{2 \cdot M_{pl.2.Rd} + n_s \cdot n \cdot F_{t.Rd}}{m + n}$$

Versagensmodus 3

$$F_{T.3.Rd} := 2 \cdot F_{t.Rd}$$

Versagen des Trägerstegs

$$F_{t.wb.Rd} := l_{eff.1} \cdot t_w \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M0}}$$

Zulässige Flanschezugkraft

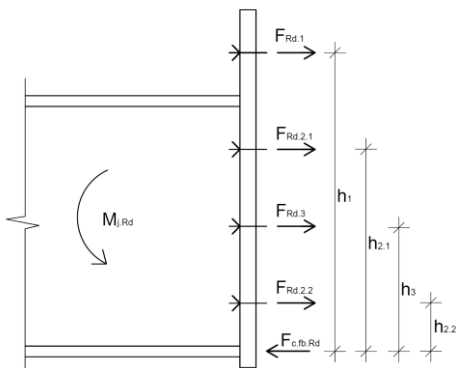
$$F_{Rd.3} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}, F_{t.wb.Rd})$$

Normalkrafttragfähigkeit des Gesamtanschlusses

Auf der sicheren Seite liegend werden nur die symmetrisch angeordneten Schraubenreihen zur Normalkrafttragfähigkeit herangezogen. Die Grenzzugkraft der Gesamtverbindung N_{Rd} ergibt sich aus der Summe der symmetrisch angeordneten Schraubenreihen.

$$N_{Rd} := \sum F_{Rd,r}$$

Momententragfähigkeit des Gesamtanschlusses



Die Momententragfähigkeit des Anschlusses ergibt sich aus der Summe der Grenztragfähigkeiten der einzelnen Schraubenreihen multipliziert mit den dazugehörigen Hebelarmen.

$$M_{j,Rd} := \sum_{rx} (h_x \cdot F_{Rd,x})$$

Abb. 31 Darstellung der Berechnungshebelarme

Bei einem momentenbelasteten Anschluss sind zwei weitere Kriterien zu untersuchen

1. Untersuchung auf plastisches Umlagerungsvermögen der Schraubenreihen
2. Beanspruchbarkeit des Druckflansches

Untersuchung auf plastisches Umlagerungsvermögen der Schraubenreihen

Um ein plastisches Umlagerungsvermögen gewährleisten zu können, müssen Stirnplattenverbindungen bei denen mehr als eine Schraubenreihe rechnerisch angesetzt wird auf folgende Bedingung untersucht werden (z.B.: überstehende Stirnplatte).

"Abminderung der Momentenbeanspruchbarkeit ist nötig" := wenn $(F_{Rd,x,max} \leq 1,9 \cdot F_{t,Rd}, \text{"nein"}, \text{"ja"})$

Dabei ist $F_{Rd,x,max}$ Schraubenreihe, deren Flanschzugkraft größer als $1,9 F_{t,Rd}$ ist, und die am weitesten vom Druckpunkt entfernt liegt.

$F_{Rd,x}$ Grenzzugkraft der weiteren Schraubenreihe(n)

$h_{x,max}$ Hebelarm der Schraubenreihe $F_{Rd,x,max}$

h_x Hebelarm der weiteren Schraubenreihe(n)

Falls eine Abminderung nötig erfolgt diese folgendermaßen.

$$F_{Rd,x} := F_{Rd,x} \cdot \frac{h_x}{h_{x,max}}$$

Beanspruchbarkeit des Druckflansches nach DIN EN 1993-1-8

$$F_{c.fb.Rd} := \frac{M_{c.Rd}}{(h - t_f)}$$

Einwirkung auf den Druckflansch

In der DIN EN 1993-1-8 wird zwar die Beanspruchbarkeit des Druckflansches aufgeführt, jedoch nicht die Ermittlung der Einwirkung. Die hier gezeigte Ermittlung der Einwirkung auf den Druckflansch wird von vergleichenden Rechnungen gegen das Ringbuch Ausgabe 2013 [13] und dem EDV – Programm Frilo.System.Next bestätigt.

Kriterium für die Abminderung

$$\Delta F_{c.fb} := \sum_{rx} F_{Rd.x} - F_{c.fb.Rd}$$

Die Summe aller maßgebenden Flanschzugkräfte der Schraubenreihen subtrahiert mit der Beanspruchbarkeit des Druckflansches ergibt das Kriterium für die Abminderung.

"Abminderung der Momentenbeanspruchbarkeit ist nötig" := wenn($\Delta F_{c.fb} < 0$, "nein", "ja")

Abminderung

Ist eine Abminderung notwendig erfolgt diese an der Schraubenreihe mit dem geringsten Abstand zum Druckpunkt.

$$F_{Rd.min.} := F_{Rd.min} - \Delta F_{c.fb}$$

$F_{Rd.min}$ = Schraubenreihe mit dem geringsten Abstand zum Druckpunkt.

Momententragfähigkeit

$M_{j.Rd} := \sum_{rx} (h_x \cdot F_{Rd.x})$ Nach Überprüfung des plastischen Umformvermögens und des Druckflanschversagens kann die Momententragfähigkeit mit den in Abb. 31 dargestellten Hebelarmen ermittelt werden.

$$\eta_M := \frac{M_{y.Ed}}{M_{j.Rd}}$$

Überlagerung von Momenten – und Normalkraftbeanspruchung

Die Auslastung ergibt sich aus der linearen Überlagerung von M und N.

$$\eta_v := \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y.Ed}}{M_{j.Rd}}$$

3.2 Zahlenbeispiel

In diesem Kapitel soll eine ausführliche Beispielrechnung mit allen erforderlichen Nachweisen an einem überstehenden Stirnplattenstoß gezeigt werden. Die Nachweisreihenfolge orientiert sich am Kraftfluss. Es werden nur zwei Schraubenreihen für die Momententragfähigkeit angesetzt. Die ermittelten Tragfähigkeiten entsprechen so dem Ringbuch aus dem Jahre 2000 [12].

Übersicht der erforderlichen Nachweise

- Querschnittsnachweis nach DIN EN 1993-1-1
- Schweißnahtnachweis nach DIN EN 1993-1-8
- Schraubennachweis nach DIN EN 1993-1-8
- Stirnplatten-Verbindungsnachweis nach DIN EN 1993-1-8
- Nachweis der erforderlichen Z-Güte nach DIN EN 1993-1-1 sowie DIN EN 1993-1-10

Schnittgrößen

$$M_{y,Ed.1} := 120 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (\text{überstehende Stirnplatte})$$

$$M_{y,Ed.2} := 50 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (\text{bündige Stirnplatte})$$

$$N_{Ed} := 0 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} := 75 \text{ kN}$$

Profil HEA 240

Trägerhöhe

$$h := 230 \text{ mm}$$

Trägerbreite

$$b := 240 \text{ mm}$$

Gurthöhe

$$t_f := 12 \text{ mm}$$

Stegbreite

$$t_w := 7.5 \text{ mm}$$

Ausrundung

$$r := 21 \text{ mm}$$

elastisch Widerstandsmoment

$$W_y := 675 \text{ cm}^3$$

Momententräg. plastische

$$M_{pl,y,Rd} := 175 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Querschnittsfläche

$$A := 76.8 \text{ cm}^2$$

Hebelarme

Schrauben- Flanschabstand 1

$$z_1 := 40 \text{ mm}$$

Schrauben- Flanschabstand 2

$$z_2 := 43 \text{ mm}$$

Schrauben- Stegabstand

$$z := 56.25 \text{ mm}$$

Material S 235

charakt. Streckgrenze

$$f_{y,k} := 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

charakt. Zugfestigkeit

$$f_{u,k} := 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Schweißnaht

Teilsicherheitsbeiwert

$$\gamma_{Mw} := 1.25$$

Nahtdicke Steg

$$a_w := 4 \text{ mm}$$

Nahtdicke Gurt

$$a_f := 7 \text{ mm}$$

Korrelationsbeiwert

$$\beta_w := 0.8$$

Schrauben M 20 10.9

Schraubendurchmesser

$$d_s := 20 \text{ mm}$$

Lochdurchmesser

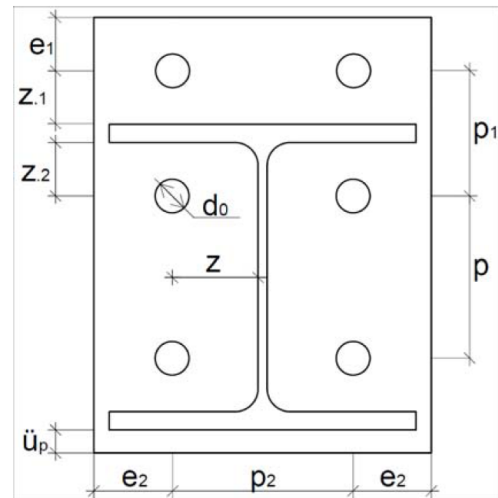
$$d_0 := 21 \text{ mm}$$

Querschnitt Schaft

$$A_s := 2.45 \text{ cm}^2$$

Zugfestigkeit

$$f_{u,b} := 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

**Stirnplatte**

Höhe Platte

$$h_p := 320 \text{ mm}$$

Breite Platte

$$b_p := 240 \text{ mm}$$

Dicke Platte

$$t_p := 20 \text{ mm}$$

$$e_1 := 30 \text{ mm}$$

$$e_2 := \frac{(b_p - 2 \cdot z - t_w)}{2} = 60 \text{ mm}$$

$$p := h - 2z_2 - 2 \cdot t_f = 120 \text{ mm}$$

$$p_1 := z_1 + z_2 + t_f = 95 \text{ mm}$$

$$p_2 := b_p - 2 \cdot e_2 = 120 \text{ mm}$$

$$\ddot{u}_p := h_p - h - e_1 - z_1 = 20 \text{ mm}$$

Teilsicherheitsbeiwert

$$\gamma_{M0} := 1.0 \quad \gamma_{M1} := 1.1 \quad \gamma_{M2} := 1.25$$

Beiwert

$$\alpha_v := 0.5$$

Faktor

$$k_2 := 0.9$$

Grenzzugkraft

$$F_{t,Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{u,b} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 176.4 \text{ kN}$$

Querschnittsnachweis des Trägers**Querschnittsklassifizierung des Doppel-T-Profils (DIN EN 1993-1-1 5.5.2)**Materialbeiwert ε

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{f_{y,k}}} = 1$$

Querschnittsklassifizierung des auf druck beanspruchten Flansches (DIN EN 1993-1-1 Tab. 5.2)

Rechnerische Länge und Materialstärke des Gurtquerschnitts

$$c := \frac{b - 2 \cdot r - 2 \cdot t_w}{2} = 91.5 \cdot \text{mm} \quad t := t_f = 12 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{c}{t} = 7.625 < 9 \cdot \varepsilon = 9 \quad \text{Kriterium für Querschnittsklasse 1 erfüllt}$$

Querschnittsklassifizierung des auf biegung beanspruchten Trägerstegs (DIN EN 1993-1-1 Tab. 5.2)

Rechnerische Länge und Materialstärke des Trägerstegs

$$c := h - 2 \cdot r - 2 \cdot t_f = 164 \cdot \text{mm} \quad t := t_w = 7.5 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{c}{t} = 21.867 < 72 \cdot \varepsilon = 72 \quad \text{Kriterium für Querschnittsklasse 1 erfüllt}$$

Der Gesamtquerschnitt erfüllt das Kriterium der Querschnittsklasse 1.

Querschnittsnachweis (DIN EN 1993-1-1 6.2.3)

Der Nachweis erfolgt Elastisch-Elastisch, obwohl aufgrund der Querschnittsklassifizierung ein Nachweis mit plastischen Querschnittswerten möglich wäre.

Normalspannungsnachweis

$$M_{Ed} := \max(M_{y,Ed.1}, M_{y,Ed.2}) = 120 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma := \frac{M_{Ed}}{W_y} + \left| \frac{N_{Ed}}{A} \right| = 17.778 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Auslastung

$$\eta_{\sigma,v} := \frac{\sigma}{f_{y,k}} = 75.65 \cdot \%$$

Schubspannungsnachweis

$$V_{Ed} = 75 \cdot \text{kN}$$

$$\tau_{Rd} := \frac{f_{y,k}}{\sqrt{3}} = 13.568 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\tau_{Ed} := \frac{V_{Ed}}{t_w \cdot h} = 4.348 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Auslastung

$$\eta_{\tau} := \frac{\tau_{Ed}}{\tau_{Rd}} = 32.045 \cdot \%$$

Interaktion

$$\sigma_v := \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau_{Ed}^2} = 19.307 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\eta_{\sigma_v} := \frac{\sigma_v}{f_{y,k}} = 82.157 \cdot \%$$

Nachweis der Schweißnähte (DIN EN 1993 1-8 4.5.3)

Anmerkung: Der Schweißnahtnachweis wird nach dem richtungsbezogenen Verfahren geführt.
Vereinfacht wird angenommen:

1. Momentenbelastung wird von den Gurtnähten aufgenommen
2. Querkraft wird von den Stegnähten aufgenommen

Überprüfung der Schweißnahtabmessung (DIN EN 1993-1-8 NA 4.5.2)

maximale Blechstärke der angeschlossenen Bauteile

$$t_{\max} := \max(t_f, t_w, t_p) = 20 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Flanschnaht } a_f := \text{wenn} \left[a_f \geq \sqrt{(t_{\max} \cdot \text{mm})} - 0.5 \cdot \text{mm}, a_f, \text{"nicht zulässig"} \right] = 7 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Stegnaht } a_w := \text{wenn} \left[a_w \geq \sqrt{(t_{\max} \cdot \text{mm})} - 0.5 \cdot \text{mm}, a_w, \text{"nicht zulässig"} \right] = 4 \cdot \text{mm}$$

Beanspruchbarkeit der Schweißnaht für das richtungsbezogene Verfahren (DIN EN 1993-1-8 4.5.3.2)

$$f_{1.w.Rd.} := \frac{f_{u.k}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = 36 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$f_{2.w.Rd.} := \frac{f_{u.k} \cdot 0.9}{\gamma_{M2}} = 25.92 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Nachweis der Gurtnaht

Gurtnahtfläche

$$A_f := (2b - 2 \cdot r - t_w) \cdot a_f = 30.135 \cdot \text{cm}^2$$

Gurtkräfte

$$F_V := \frac{M_{Ed}}{(h - t_f)} + \frac{1}{2} \cdot |N_{Ed}| = 550.459 \cdot \text{kN}$$

Schweißnahtspannung des Gurt

$$\sigma_w := \frac{F_V}{A_f} = 18.266 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Richtungsbezogene Spannungen

σ senkrecht

$$\sigma_s := \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = 12.916 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

τ senkrecht

$$\tau_s := \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = 12.916 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

τ parallel

$$\tau_p := 0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Auslastungen

$$\eta_{w.f.1} := \frac{\sqrt{\sigma_s^2 + 3 \cdot \tau_s^2 + 3 \cdot \tau_p^2}}{f_{1.w.Rd.}} = 71.757 \cdot \%$$

$$\eta_{w.f.2} := \frac{\sigma_s}{f_{2.w.Rd.}} = 49.831 \cdot \%$$

Nachweis der Stegnaht

Stegnahtfläche

$$A_w := 2(h - 2 \cdot r - 2t_f) \cdot a_w = 13.12 \cdot \text{cm}^2$$

Richtungsbezogene Spannungen

$$\sigma_s := 0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\tau_s := 0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\tau_p := \frac{V_{Ed}}{A_w} = 5.716 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\eta_{w.w} := \frac{\sqrt{\sigma_s^2 + 3 \cdot \tau_s^2 + 3 \cdot \tau_p^2}}{f_{1.w.Rd.}} = 27.503 \cdot \%$$

Maximale Auslastung der Schweißnähte

$$\eta_{w} := \max(\eta_{w.f.1}, \eta_{w.f.2}, \eta_{w.w}) = 71.757 \cdot \%$$

Nachweis der Schrauben (DIN EN 1993-1-8 2.6)

Anmerkung: Der Querkraftabtrag wird über die Schraubenreihe am Druckflansch realisiert.
Die beiden Schraubenreihen am Zugflansch übernehmen den Lastabtrag infolge Momentenbelastung.

Überprüfung der Rand und Lochabstände (DIN EN 1993-1-8 Tab. 3.3)

$$e_1 = 30 \cdot \text{mm} \quad e_2 = 60 \cdot \text{mm} \quad p_1 = 95 \cdot \text{mm} \quad p_2 = 120 \cdot \text{mm}$$

$$e_{1.} := \text{wenn}(e_1 \geq 1.2 \cdot d_0, e_1, \text{"nicht zulässig"}) = 30 \cdot \text{mm}$$

$$e_{2.} := \text{wenn}(e_2 \geq 1.2 \cdot d_0, e_2, \text{"nicht zulässig"}) = 60 \cdot \text{mm}$$

$$p_{1.} := \text{wenn}(p_1 \geq 2.2 \cdot d_0, p_1, \text{"nicht zulässig"}) = 95 \cdot \text{mm}$$

$$p_{2.} := \text{wenn}(p_2 \geq 2.4 \cdot d_0, p_2, \text{"nicht zulässig"}) = 120 \cdot \text{mm}$$

Nachweis der zugbelasteten Schrauben

Kann entfallen da dieser Nachweis im T-Stummelnachweis implementiert ist.

Nachweis der querkraftbelasteten Schrauben (DIN EN 1993-1-8 Tab. 3.4)

Annahme:

1. Der Querkraftabtrag wird über die Schraubenreihe am Druckflansch realisiert
2. Scherfuge im Gewinde

$$F_{v,Rd} := \frac{\alpha_v \cdot f_{u,b} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 98 \cdot \text{kN}$$

$$\eta_{v.} := \frac{V_{Ed}}{2 \cdot F_{v,Rd}} = 38.265 \cdot \%$$

Nachweis des Lochleibens im Grundmaterial (DIN EN 1993-1-8 Tab. 3.4)

$$e_{1.} = 30 \cdot \text{mm} \quad e_{2.} = 60 \cdot \text{mm} \quad p_{1.} = 95 \cdot \text{mm} \quad p_{2.} = 120 \cdot \text{mm}$$

In Krafrichtung

Randschrauben

$$\alpha_d := \min\left(\frac{e_{1.}}{3 \cdot d_0}, \frac{f_{u,b}}{f_{u,k}}, 1\right) = 0.476$$

Innenschrauben

$$\alpha_d := \min\left(\frac{p_{1.}}{3 \cdot d_0}, \frac{f_{u,b}}{f_{u,k}}, 1\right) = 1$$

Maßgebendes

$$\tilde{\alpha} := \min(\alpha_d, \alpha_{d.}) = 0.476$$

Quer zur Krafrichtung

Randschrauben

$$k_1 := \min\left(2.8 \cdot \frac{e_{2.}}{d_0} - 1.7, 1.4 \cdot \frac{p_{2.}}{d_0} - 1.7, 2.5\right) = 2.5$$

Innenschraube

$$k_{1.} := \min\left(1.4 \cdot \frac{p_{2.}}{d_0} - 1.7, 2.5\right) = 2.5$$

Maßgebendes k_1

$$k_{1..} := \min(k_1, k_{1.}) = 2.5$$

$$F_{b,Rd} := \frac{k_{1..} \cdot \tilde{\alpha} \cdot f_{u,k} \cdot d_S \cdot t_p}{\gamma_{M2}} = 137.143 \cdot \text{kN}$$

$$\eta_b := \frac{V_{Ed}}{2 F_{b,Rd}} = 27.344 \cdot \%$$

Nachweis der Stirnplattenverbindung (DIN EN 1993-1-8 6.2.4)

$$\frac{|N_{Ed}|}{(A \cdot f_{y,k})} = 0.0\% < 5\%$$

Die Normalkrafteinwirkung liegt unter 5% der plastischen Querschnittstragfähigkeit. Somit kann die einwirkende Normalkraft vernachlässigt werden.

Schraubenreihe 1 (äußere Schraubenreihe neben Zugflansch)Ermittlung der effektiven Einflussbreite (DIN EN 1993-1-8 Tab. 6.6)

$$m_x := z_1 - 0.8 \cdot a_f \cdot \sqrt{2} = 32.08 \cdot \text{mm} \quad e := \frac{b_p - p_2}{2} = 60 \cdot \text{mm}$$

$$e_x := e_1 = 30 \cdot \text{mm} \quad w := p_2 = 120 \cdot \text{mm}$$

Kreisförmige Anordnung

$$l_{\text{eff,cp}} := \min(2 \cdot \pi \cdot m_x, \pi \cdot m_x + w, \pi \cdot m_x + 2 \cdot e) = 201.567 \cdot \text{mm}$$

Andere Anordnung

$$l_{\text{eff,nc}} := \min(4 \cdot m_x + 1.25 \cdot e_x, e + 2m_x + 0.625 \cdot e_x, 0.5 \cdot b_p, 0.5 \cdot w + 2 \cdot m_x + 0.625 \cdot e_x) = 120 \cdot \text{mm}$$

Modus 1 $l_{\text{eff,1}} := \text{wenn}(l_{\text{eff,nc}} \leq l_{\text{eff,cp}}, l_{\text{eff,nc}}, l_{\text{eff,cp}}) = 120 \cdot \text{mm}$

Modus 2 $l_{\text{eff,2}} := l_{\text{eff,nc}} = 120 \cdot \text{mm}$

Plastische Widerstandsmomente der Stirnplatte (DIN EN 1993-1-8 Tab. 6.2)

$$M_{\text{pl,1,Rd}} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot l_{\text{eff,1}} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M0}} = 2.82 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad M_{\text{pl,2,Rd}} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot l_{\text{eff,2}} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M0}} = 2.82 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Ermittlung der maßgebend Flanschzugkraft (DIN EN 1993-1-8 Tab.6.2)

Berechnungshebelarme (DIN EN 1993-1-8 Bild 6.10)

$$m_1 := m_x = 32.08 \cdot \text{mm} \quad n := \text{wenn}(e_x \leq 1.25 \cdot m_1, e_x, 1.25 \cdot m_1) = 30 \cdot \text{mm}$$

Versagenart 1 = Plattenversagen

$$F_{T,1,Rd} := \frac{4 \cdot M_{\text{pl,1,Rd}}}{m_1} = 351.617 \cdot \text{kN}$$

Versagenart 2 = Schraubenversagen unter Abstützkräften

$$F_{T,2,Rd} := \frac{2 \cdot M_{\text{pl,2,Rd}} + n \cdot (2 \cdot F_{t,Rd})}{m_1 + n} = 261.339 \cdot \text{kN}$$

Versagenart 3 = reines Schraubenversagen

$$F_{T,3,Rd} := 2 \cdot F_{t,Rd} = 352.8 \cdot \text{kN}$$

maßgebende Flanschzugkraft Schraubenreihe 1

$$F_{Rd,1} := \min(F_{T,1,Rd}, F_{T,2,Rd}, F_{T,3,Rd}) = 261.339 \cdot \text{kN}$$

Schraubenreihe 2 (innere Schraubenreihe neben Zugflansch)

$$m := z - 0.8 \cdot a_w \cdot \sqrt{2} = 51.725 \cdot \text{mm}$$

$$m_2 := z_2 - 0.8 \cdot a_f \cdot \sqrt{2} = 35.08 \cdot \text{mm}$$

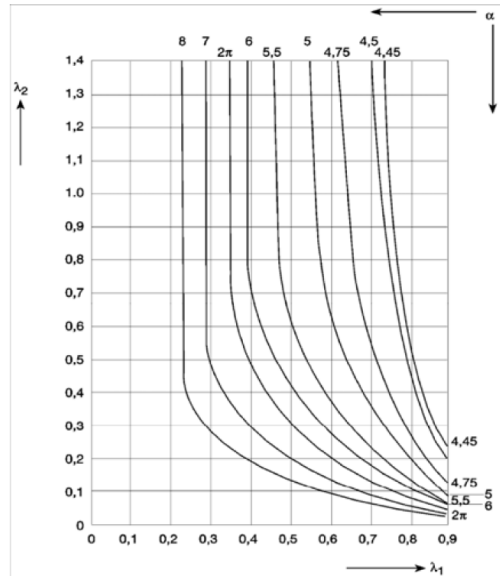
$$e = 60 \cdot \text{mm}$$

$$\lambda_1 := \frac{m}{m + e} = 0.463$$

$$\lambda_2 := \frac{m_2}{m + e} = 0.314$$

Eingabewert α aus dem nebestehenden Diagramm.

$$\alpha := 6.5$$



Tab. 5 Wirksame Längen für Stirnbleche [C2], S. 91, Bild 6.11

Ermittlung der effektiven Einflussbreite (DIN EN 1993-1-8 Tab. 6.6)

Kreisförmiges Muster

$$l_{\text{eff,cp}} := 2 \cdot \pi \cdot m = 324.995 \cdot \text{mm}$$

Modus 1

$$l_{\text{eff,1}} := \text{wenn}(l_{\text{eff,nc}} \leq l_{\text{eff,cp}}, l_{\text{eff,nc}}, l_{\text{eff,cp}}) = 324.995 \cdot \text{mm}$$

Nicht kreisförmiges Muster

$$l_{\text{eff,nc}} := \alpha \cdot m = 336.209 \cdot \text{mm}$$

Modus 2

$$l_{\text{eff,2}} := l_{\text{eff,nc}} = 336.209 \cdot \text{mm}$$

Plastische Widerstandsmomente der Stirnplatte (DIN EN 1993-1-8 Tab. 6.2)

Berechnungshebelarme (DIN EN 1993-1-8 Bild 6.10)

$$n := \text{wenn}(e \leq 1.25 \cdot m, e, 1.25 \cdot m) = 60 \cdot \text{mm}$$

$$m = 51.725 \cdot \text{mm}$$

$$M_{\text{pl,1,Rd}} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot l_{\text{eff,1}} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M0}} = 763.738 \cdot \text{kN} \cdot \text{cm}$$

$$M_{\text{pl,2,Rd}} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot l_{\text{eff,2}} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M0}} = 790.092 \cdot \text{kN} \cdot \text{cm}$$

Ermittlung der maßgebend Flanschzugkraft (DIN EN 1993-1-8 Tab. 6.2)

Versagenart 1 = Plattenversagen

$$F_{T,1,Rd} := \frac{4 \cdot M_{\text{pl,1,Rd}}}{m} = 590.619 \cdot \text{kN}$$

Versagenart 2 = Schraubenversagen unter Abstützkräften

$$F_{T,2,Rd} := \frac{2 \cdot M_{\text{pl,2,Rd}} + n \cdot (2 \cdot F_{t,Rd})}{m + n} = 330.902 \cdot \text{kN}$$

Versagenart 3 = reines Schraubenversagen

$$F_{T,3,Rd} := 2 \cdot F_{t,Rd} = 352.8 \cdot \text{kN}$$

Trägersteg auf Zug

$$F_{t,wb,Rd} := l_{\text{eff,1}} \cdot t_w \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M0}} = 572.803 \cdot \text{kN}$$

Beanspruchbarkeit der Schraubenreihe 2 ohne Untersuchung auf plastisches Umlagerungsvermögen

$$F_{Rd,2} := \min(F_{T,1,Rd}, F_{T,2,Rd}, F_{T,3,Rd}, F_{t,wb,Rd}) = 330.902 \cdot \text{kN}$$

Überprüfung der Schraubenreihe 2 auf plastisches Umlagerungsvermögen für $M_{y,Ed.1}$ (DIN 1993-1-8 6.26)

"Abminderung der Momentenbeanspruchbarkeit ist nötig" := wenn($F_{Rd.1} \leq 1.9 \cdot F_{t,Rd}$, "nein", "ja") = "nein"

Hebelarme (Abstand der Schraubenreihen zum Druckpunkt) für Schraubenreihe 1 und 2

$$h_1 := h + z_1 - 0.5 \cdot t_f = 264 \cdot \text{mm}$$

$$h_2 := h - z_2 - t_f - 0.5 \cdot t_f = 169 \cdot \text{mm}$$

$$F_{Rd.2} := \text{wenn} \left(F_{Rd.1} \leq 1.9 \cdot F_{t,Rd}, F_{Rd.2}, F_{Rd.2} \cdot \frac{h_2}{h_1} \right) = 330.902 \cdot \text{kN}$$

Nachweis des Druckflansches für $M_{y,Ed.1}$

Beanspruchbarkeit des Druckflansches (DIN 1993-1-8 6.2.6.7)

$$F_{c.fb,Rd} := \frac{M_{pl,y,Rd}}{(h - t_f)} = 802.752 \cdot \text{kN}$$

Kriterium für die Abminderung

$$\Delta F_{c.fb} := F_{Rd.1} + F_{Rd.2} - F_{c.fb,Rd} = -210.512 \cdot \text{kN}$$

"Abminderung der Momentenbeanspruchbarkeit ist nötig" := wenn($\Delta F_{c.fb} < 0$, "nein", "ja") = "nein"

Reduzierte Flanschzugkraft $F_{Rd.2,c.fb}$ falls eine Abminderung nötig wird

$$F_{Rd.2,c.fb} := F_{Rd.2} - \Delta F_{c.fb} = 541.414 \cdot \text{kN}$$

$$F_{Rd.2.2..} := \text{wenn}(\Delta F_{c.fb} > 0, F_{Rd.2,c.fb}, F_{Rd.2}) = 330.902 \cdot \text{kN}$$

Momententragfähigkeit $M_{j,Rd.1}$ (Tragfähigkeit überstehende Stirnplatte)

$$M_{j,Rd.1} := F_{Rd.1} \cdot h_1 + F_{Rd.2.2..} \cdot h_2 = 124.916 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\eta_{M.1} := \frac{M_{y,Ed.1}}{M_{j,Rd.1}} = 96.065 \cdot \%$$

Momententragfähigkeit $M_{j,Rd.2}$ (Tragfähigkeit bündige Stirnplatte)**Nachweis des Druckflansches für $M_{y,Ed.2}$**

Beanspruchbarkeit des Druckflansches

$$F_{c.fb,Rd} = 802.752 \cdot \text{kN}$$

Kriterium für die Abminderung

$$\Delta F_{c.fb} := F_{Rd.2} - F_{c.fb,Rd} = -471.851 \cdot \text{kN}$$

"Abminderung der Momentenbeanspruchbarkeit ist nötig" := wenn($\Delta F_{c.fb} < 0$, "nein", "ja") = "nein"

Reduzierte Flanschzugkraft $F_{Rd.2,c.fb}$ falls eine Abminderung nötig wird

$$F_{Rd.2,c.fb} := F_{Rd.2} - \Delta F_{c.fb} = 802.752 \cdot \text{kN}$$

$$F_{Rd.2.2..} := \text{wenn}(\Delta F_{c.fb} > 0, F_{Rd.2,c.fb}, F_{Rd.2}) = 330.902 \cdot \text{kN}$$

$$M_{j,Rd.2} := F_{Rd.2.2..} \cdot h_2 = 55.922 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\eta_{M.2} := \frac{M_{y,Ed.2}}{M_{j,Rd.2}} = 89.41 \cdot \%$$

Erforderliche Z - Güte **Z_{Ed} nach DIN EN 1993-1-10 (Tab. 3.2)**

Einfluss der Schweißnahtdicke

$$z_a := 3$$

Einfluss der Nahtform

$$z_b := 0$$

Einfluss der Dicke des in Querrichtung beanspruchten Bauteils

$$z_c := 6$$

Einfluss der Behinderung der Schweißnahtschrumpfung

$$z_d := 0$$

Einfluss des Vorwärmens

$$z_e := 0$$

$$Z_{Ed} := z_a + z_b + z_c + z_d + z_e = 9$$

Erforderliche Z_{Rd} nach DIN EN 1993-1-1 (Tab.3.2)

$$\text{Ergebnis} := \text{wenn}(Z_{Ed} < 10, \text{"nein"}, \text{wenn}(Z_{Ed} < 20, \text{"ja = Z 15"}, \text{wenn}(Z_{Ed} < 30, \text{"ja = Z 25"}, \text{"ja Z = 35"})))$$

Ist eine Z-Güte erforderlich := Ergebnis = "nein"

3.3 Gegenüberstellung von Stirnplatten Berechnungsverfahren

Berechnungshintergründe

Alle dargestellten Ergebnisse orientieren sich an den Ringbüchern der Jahre 1979 [11], 2000 [12] und 2013 [13].

Grundlage für die Vergleichsberechnungen sind folgende Normen und Sachbücher:

- DIN 18800 Teil 1 [C5] und „Stahlbau“ [4]
- DIN EN 1993-1-8 [C2]

Hinweis

Die Ermittlung der Ergebnisse wird analog zu den Beschreibungen aus Kapitel 3.1 durchgeführt.

In den Anhängen D bis G sind alle zur Anwendung kommenden Berechnungsalgorithmen für den Versuch 1 beispielhaft hinterlegt.

Berechnungshinweise für die Verfahren nach Eurocode

In den Ringbüchern, die sich am EC 3 orientieren [12][13] wird kein Ausfall der Abstützkräfte berücksichtigt. Der grundlegende Unterschied der Ringbücher aus dem Jahr 2000 und dem Jahr 2013 besteht darin, dass in der Ausgabe des Jahres 2013 alle Schraubenreihen zur Momententragfähigkeit angesetzt werden. Dies führt zu höheren Grenzanschlussmomenten und stellt die maximal erreichbaren Tragfähigkeiten nach DIN EN 1993-1-8 da. Der Berechnungsalgorithmus ist sehr umfangreich. Die Momententragfähigkeiten, welche in Anlehnung an das DSTV Ringbuch des Jahres 2000 ermittelt werden, sind mit einem überschaubareren Rechen- beziehungsweise Programmieraufwand zu ermitteln. Dieses Verfahren wird auch in der Fachliteratur (z.B.: [6]) geschildert.

Berechnungshinweise für die Verfahren nach DIN 18800

Die Tragfähigkeiten die im DSTV Ringbuch [11] für bündige Stirnplatten angegeben werden, lassen den Schluss zu, dass keine separaten Schraubennachweise geführt wurden. In den graphischen Auswertungen wird ein separater Schraubennachweis berücksichtigt. Somit weichen die Ergebnisse im Bereich der maximalen Grenztragfähigkeiten (dicke Stirnplatten) teilweise von dem DSTV Ringbuch [11] ab.

Momententragfähigkeit [kNm] in Abhängigkeit zur Stirnplattendicke [mm]

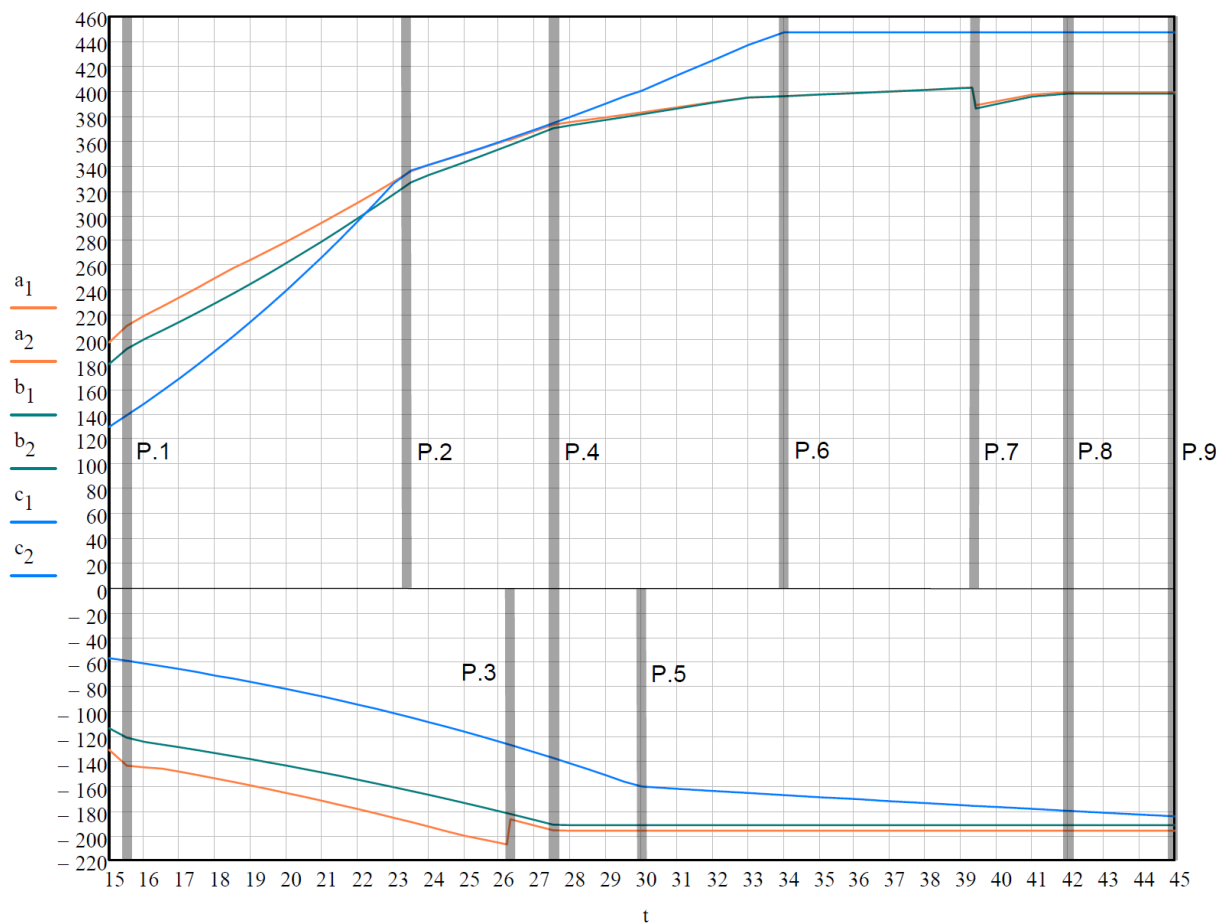


Abb. 33 Grenzanschlussmomente für Vergleich 1

a_x = nach DIN EN 1993-1-8 in Anlehnung [13]

b_x = nach DIN EN 1993-1-8 in Anlehnung [12]

c_x = nach DIN 18800 in Anlehnung [11]

Erläuterungen

Relevante Punkte der Diagrammkurve a_1 und a_2 (in Anlehnung [13])

P.1 = Übergang von Plattenversagen zu Schraubenversagen unter Abstützkräften für die Schraubenreihen r2.1 und r2.2 (ausgesteifte Schraubenreihen).

P.2 = Übergang von Plattenversagen zu Schraubenversagen unter Abstützkräften für Schraubenreihe r1 (nicht ausgesteifte Schraubenreihe).

P.3 = Berücksichtigung des plastischen Umformvermögens (die Flanschzugkraft der Schraubenreihe r2.1 überschreitet das 1,9 fache der Schraubengrenzzugkraft).

P.4 = Übergang von Schraubenversagen unter Abstützkräften zu reinen Schraubenversagen für die Schraubenreihen r2.1 und r2.2.

P.7 = Berücksichtigung des Plastischen Umformvermögens (die Flanschzugkraft der Schraubenreihe r1 überschreitet das 1,9 fache der Schraubengrenzzugkraft).

P.8 = Übergang von Schraubenversagen unter Abstützkräften zu reinen Schraubenversagen für die Schraubenreihe r1.

Anmerkung zur Diagrammkurve a_1 : Ab einer Plattendicke von 19 mm wird die Tragfähigkeit der Schraubenreihe 2.2 abgemindert, da die maximale Tragfähigkeit des Druckflansches erreicht wird. Ab einer Plattendicke von 33 mm trägt Schraubenreihe 2.2 rechnerisch nicht mehr zur Momententragfähigkeit bei, und Schraubenreihe 2.1 wird abgemindert.

Relevante Punkte der Diagrammkurven b_1 und b_2 (in Anlehnung [12])

- P.1 = Übergang von Plattenversagen zu Schraubenversagen unter Abstützkräften für Schraubenreihe r2.1 (ausgesteifte Schraubenreihe).
- P.2 = Übergang von Plattenversagen zu Schraubenversagen unter Abstützkräften für Schraubenreihe r1 (nicht ausgesteifte Schraubenreihe).
- P.4 = Übergang von Schraubenversagen unter Abstützkräften zu reinen Schraubenversagen für die Schraubenreihe r2.1.
- P.7 = Berücksichtigung des Plastischen Umformvermögens (die Flanschzugkraft der Schraubenreihe r1 überschreitet das 1,9 fache der Schraubengrenzzugkraft).
- P.8 = Übergang von Schraubenversagen unter Abstützkräften zu reinen Schraubenversagen für die Schraubenreihe r1.

Anmerkung zur Diagrammkurve b_1 : Ab einer Plattendicke von 33 mm wird die Tragfähigkeit der Schraubenreihe 2.2 abgemindert, da die maximale Tragfähigkeit des Druckflansches erreicht wird.

Relevante Punkte der Diagrammkurve c_1 (DIN 18800 in Anlehnung [11])

- P.2 = Übergang von Plattenversagen zu Schraubenversagen unter Abstützkräften
- P.6 = Übergang von Schraubenversagen unter Abstützkräften zu reinen Schraubenversagen

Relevante Punkte der Diagrammkurve c_2 (DIN 18800 in Anlehnung [11])

- P.5 = Übergang von Platten- und Zugflanschversagen zu Schraubenversagen unter Abstützkräften
- P.9 = Übergang von Schraubenversagen unter Abstützkräften zu reinem Schraubenversagen

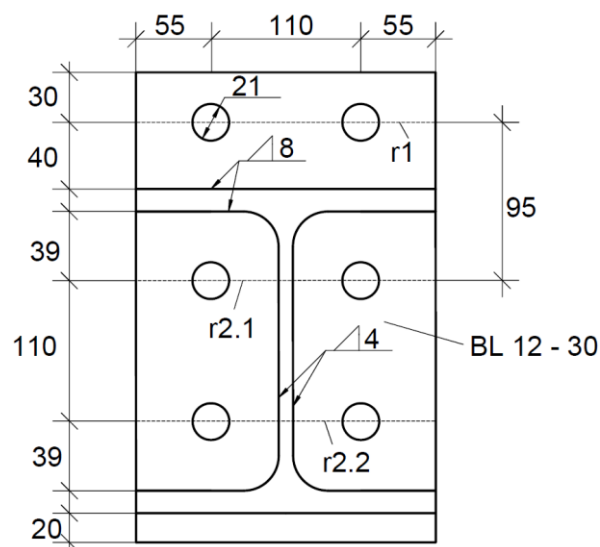
3.3.2 Vergleich 2

Träger = HEB 220

Variable = Stirnplattendicke (t_p)

In den folgenden Vergleichen werden die Momententragfähigkeiten nach DIN 18800 und DIN EN 1993-1-8 in Abhängigkeit zur Stirnplattendicke dargestellt. Die Berechnung erfolgt in Anlehnung an die Ringbücher der Jahre 1979 [11], 2000 [12] und 2013 [13]. Die Geometrie wurde dem Ringbuch aus dem Jahr 2013 entnommen. Es werden die Momententragfähigkeiten für beide Belastungsrichtungen angegeben ($+M_y/ -M_y$). Die negativen Momententragfähigkeiten geben die Werte für bündige Stirnplatten wieder.

Geometrien und Materialkennwerte



Stirnplatten - Material

$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$

Schrauben M 20 10.9

$f_y = 900 \text{ N/mm}^2$

$f_u = 1000 \text{ N/mm}^2$

Abb. 34 Geometrieübersicht Vergleich 2 (HEB 220)

Momententragfähigkeit [kNm] in Abhängigkeit zur Stirnplattendicke [mm]

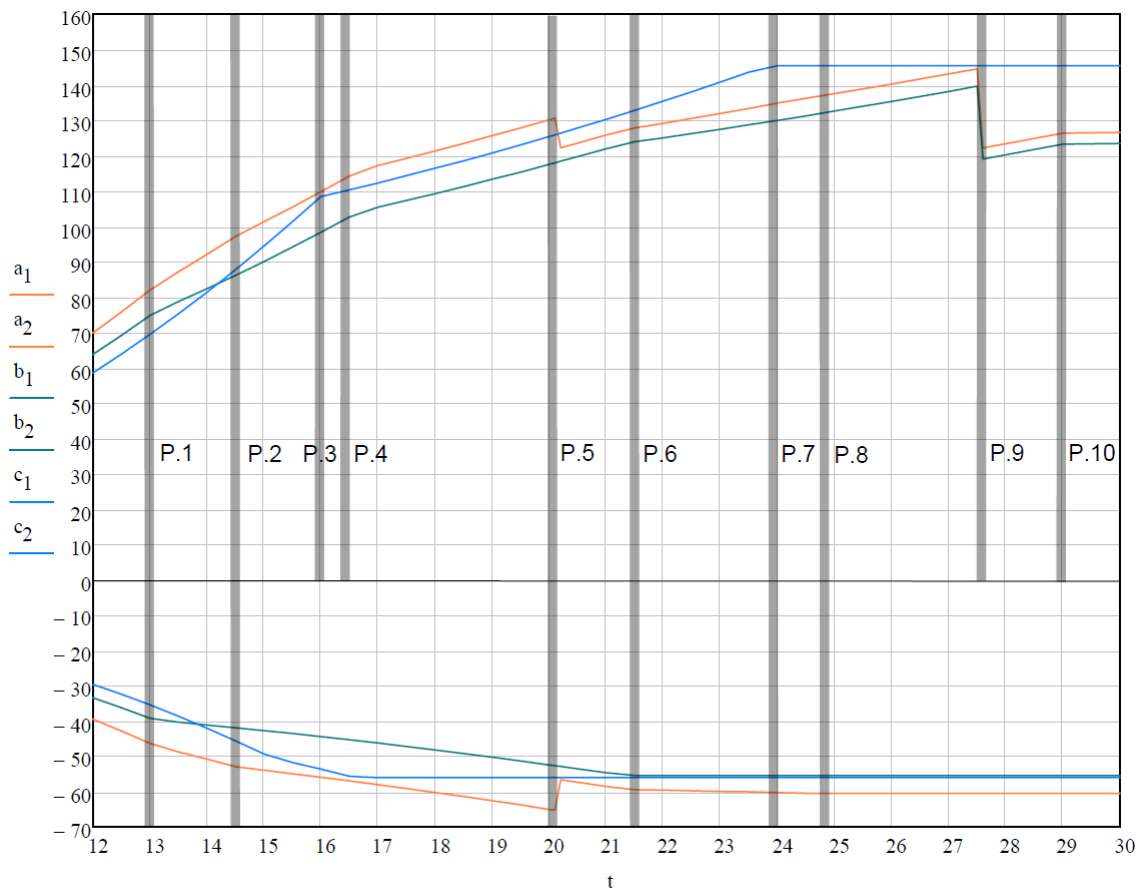


Abb. 35 Grenzanschlussmomente für Vergleich 2

a_x = nach DIN EN 1993-1-8 in Anlehnung [13]

b_x = nach DIN EN 1993-1-8 in Anlehnung [12]

c_x = nach DIN 18800 in Anlehnung [11]

Relevante Punkte der Diagrammkurve a_1 und a_2 (DIN EN 1993 in Anlehnung [13])

- P.1 = Übergang von Plattenversagen zu Schraubenversagen unter Abstützkräften für die Schraubenreihe r2.1 (ausgesteifte Schraubenreihe).
- P.2 = Übergang von Plattenversagen zu Schraubenversagen unter Abstützkräften für Schraubenreihe r2.2 (ausgesteifte Schraubenreihe).
- P.4 = Übergang von Plattenversagen zu Schraubenversagen unter Abstützkräften für Schraubenreihe r1 (nicht ausgesteifte Schraubenreihe).
- P.5 = Berücksichtigung des plastischen Umformvermögens (die Flanschzugkraft der Schraubenreihe r2.1 überschreitet das 1,9 fache der Schraubengrenzzugkraft)
- P.6 = Übergang von Schraubenversagen unter Abstützkräften zu reinen Schraubenversagen für die Schraubenreihe r2.1.
- P.8 = Übergang von Schraubenversagen unter Abstützkräften zu reinen Schraubenversagen für die Schraubenreihe r2.2.
- P.9 = Berücksichtigung des plastischen Umformvermögens (die Flanschzugkraft der Schraubenreihe r1 überschreitet das 1,9 fache der Schraubengrenzzugkraft).
- P.10 = Übergang von Schraubenversagen unter Abstützkräften zu reinen Schraubenversagen für die Schraubenreihe r1.

Anmerkung zur Diagrammkurve c_1 : Die Schraubenreihe r2.2 wird für alle Plattendicken abgemindert da für Schraubenreihe r2.1 und r2.2 die Gruppenbetrachtung für die Ermittlung der effektiven Längen maßgebend wird.

Relevante Punkte der Diagrammkurve b_1 und b_2 (DIN ENV 1993 in Anlehnung [12])

- P.1 = Übergang von Plattenversagen zu Schraubenversagen unter Abstützkräften für die Schraubenreihe r2.1 (nicht ausgesteifte Schraubenreihe).
- P.4 = Übergang von Plattenversagen zu Schraubenversagen unter Abstützkräften für Schraubenreihe r1 (nicht ausgesteifte Schraubenreihe).
- P.6 = Übergang von Schraubenversagen unter Abstützkräften zu reinen Schraubenversagen für die Schraubenreihe r2.1.
- P.9 = Berücksichtigung des Plastischen Umformvermögens (die Flanschzugkraft der Schraubenreihe r1 überschreitet das 1,9 fache der Schraubengrenzzugkraft).
- P.10 = Übergang von Schraubenversagen unter Abstützkräften zu reinen Schraubenversagen für die Schraubenreihe r1.

Relevante Punkte der Diagrammkurve c_1 (DIN 18800 in Anlehnung [x])

- P.3 = Übergang von Plattenversagen zu Schraubenversagen unter Abstützkräften
- P.7 = Übergang von Schraubenversagen unter Abstützkräften zu reinen Schraubenversagen

Relevante Punkte der Diagrammkurve c_2 (DIN 18800 in Anlehnung [11])

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die relevanten Punkte der Diagrammkurve schriftlich angegeben.

Plattenversagen → Plattenversagen unter Berücksichtigung der Zugflanschauslastung → Schraubenversagen unter Abstützkräften

3.4 Zusammenfassung

Bei den Algorithmus nach DIN 18800 ist der Berechnungsaufwand vergleichsweise gering. Nachteilig ist die Einschränkungen bezüglich der Materialgüte und der Plattengeometrie. So können nur Schraubenreihen oberhalb und unterhalb des Zugflansches in Ansatz gebracht werden. Dagegen ist es mit dem Berechnungsalgorithmus nach DIN EN 1993-1-8 möglich mehrere Schraubenreihen im vom Steg ausgesteiften Bereich zu berücksichtigen. Eine aussteifende Wirkung des Steges bleibt bei den Verfahren nach DIN 18800 generell unberücksichtigt. Bei überstehenden Stirnplatten besitzen die beiden Schraubenreihen am Zugflansch die gleichen rechnerischen Grenztragfähigkeiten. Diese beiden Gründe dürften Wohl maßgeblich für die Abweichungen zu den Bemessungsverfahren nach DIN EN 1993-1-8 sein. Einflussfaktoren sind aber auch die zusätzlichen Versagenskriterien nach DIN EN 1993-1-8. So wird das plastische Umlagerungsvermögen der Schraubenreihen und die Beanspruchbarkeit des Druckflansches berücksichtigt.

Die Abweichungen der beiden Eurocode basierten Berechnungsverfahren beruhen auf folgenden Grund. Nach aktuelle Ringbuch „Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau nach DIN EN 1993-1-8 “ [13] wird für die Ermittlung der Momententragfähigkeit auch die am Druckflansch befindliche Schraubenreihe mit angesetzt. Somit sind die Tragfähigkeitswerte der im Jahr 2000 veröffentlichten Bemessungstabellen „*Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau*“ [12] immer noch mit der aktuellen DIN EN 1993-1-8 vereinbar. Die angegeben Grenztragfähigkeiten liegen unterhalb des aktuellen Ringbuches [13].

4. Zweireihige Stirnplattenverbindungen an Rechteck-Hohlprofilen

4.1 Beschreibung von Berechnungsverfahren

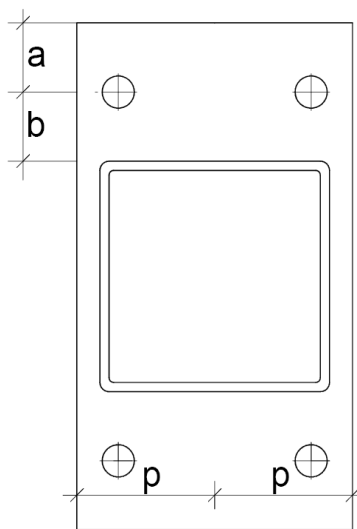
Im Kapitel 4.1 werden die Berechnungsalgorithmen nach AISC, Cidect und DIN EN 1993-1-8 beschrieben.

4.1.1 Bemessungsverfahren nach AISC

Vorbemerkung

Im „AISC Design Guide 24“ [10] wird ein Berechnungsverfahren für Hohlprofil Stirnplattenanschlüsse vorgestellt. Es können Verbindungen mit Schrauben an 2 oder 4 Seiten des Hohlprofils bemessen werden. Auf den folgenden Seiten wird auf Anschlüsse mit Schrauben an zwei Seiten des Hohlprofils eingegangen. Eine Beispielrechnung ist im Anhang H zu finden.

Geometrie, Bedingungen und Berechnungsvorwerte



t = Materialstärke des Hohlprofils
 t_p = Stirnplattendicke
 F_{yp} = Streckgrenze der Stirnplatte
 R_c = Zugfestigkeit der Schrauben
 d_b = Schraubendurchmesser
 d_h = Lochdurchmesser

Teilsicherheitsbeiwerte der Schraube

$\Phi := 0.9$

Abb. 36 Geometriedefinition

1. Der maximale Abstand der Schraubenlöcher - Außenkanten darf höchstens der Profilbreite entsprechen. Dieser Grenzfall ist in Abbildung 36 dargestellt.

Vorwerte

Die Hebelarme a und b werden für die Berechnung angepasst. Somit wird a zu a' , und b zu b' . Einflussfaktoren für die angepassten Hebelarme sind Schraubendurchmesser und die Materialstärke des Hohlprofils. In der Berechnung darf a maximal $1,25 \times b$ betragen.

$$a < 1,25 \cdot b$$

$$a' := a + \frac{d_b}{2}$$

$$b' := b - \frac{d_b}{2} + t$$

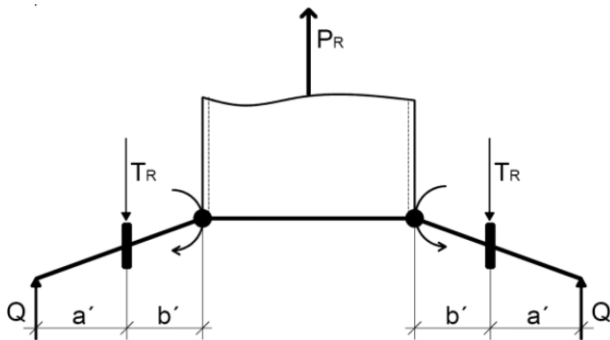
Berechnung

Nach AISC Schreibweise der Formeln ist schlecht nachvollziehbar auf welchen theoretischen Ansätzen die Berechnung basiert. Um die Grundmechanismen darstellen zu können wird eine alternative Schreibweise der Berechnung gewählt.

Schraubenversagen (alternative Schreibweise)**Plastisches Widerstandsmoment der Platte**

Zur Berechnung der Schraubenkräfte mit Berücksichtigung der Abstützkräfte muss das plastische Widerstandsmoment der Platte bestimmt werden.

$$M_{pl} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot p \cdot F_{y.p}$$



Im Flanschbereich des Hohlprofils bildet die Stirnplatte je ein Fließgelenk aus. Am Rand der Stirnplatte entstehen Abstützkräfte (Q). Diese sorgen für eine Erhöhung der Schraubenzugkraft (T_R).

Abb. 37 Statisches Ersatzmodell für den Versagensmodus Schraubenversagen unter Abstützkräften

Schraubenzugkraft

$$T_r := \frac{1}{a'} \cdot \left[(a' + b') \cdot \frac{P_r}{4} - M_{pl} \right]$$

Auslastung

$$\eta := \frac{T_r}{\Phi R_n}$$

Schraubenversagen (Schreibweise nach AISC)

$$K := \frac{4 \cdot b'}{F_{y.p} \cdot p}$$

$$\alpha := \frac{K \cdot \left(\frac{P_r}{4} \right)}{t_p^2} - 1$$

Schraubenzugkraft

$$T_r := \frac{P_r}{4} \cdot \left[1 + \left(\frac{b'}{a'} \right) \cdot \left(\frac{\alpha}{1 + \alpha} \right) \right]$$

Auslastung

$$\eta_b := \frac{T_r}{\Phi R_n}$$

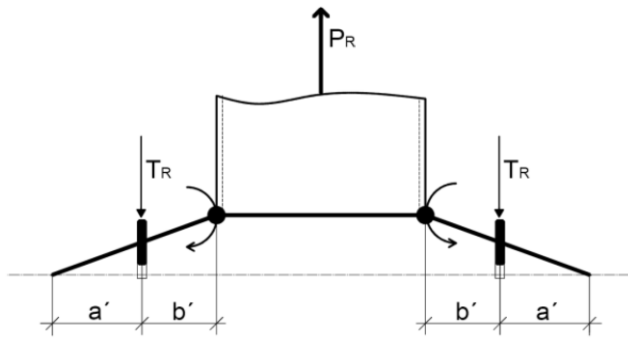
Grenzzugkraft der Stirnplatte (alternative Schreibweise)

Abb. 38 Statisches Ersatzmodell für den Versagensmodus Plattenversagen

Für die Ermittlung der Grenzzugkraft der Stirnplatte kommt das nebenstehende Ersatzmodell zur Anwendung. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die Schrauben so sehr dehnen, dass keine Abstützkräfte entstehen. Infolge dessen kann sich nur ein Fließgelenk je Seite ausbilden.

Plastisches Widerstandsmoment der Platte für eine Schraube

$$M_{pl} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot p \cdot F_{y,p}$$

Grenzzugkraft der Platte

$$R_{n.} := \left(\frac{M_{pl}}{b'} \right) \cdot 4$$

Auslastung

$$\eta_{p.} := \frac{P_r}{R_{n.}}$$

Grenzzugkraft der Stirnplatte (Schreibweise nach AISC)

$$\delta := 1 - \frac{d_h}{p}$$

Grenzzugkraft der Platte

$$R_n := \frac{t_p^2 \cdot (1 + \delta \cdot \alpha) \cdot 4}{K}$$

Auslastung

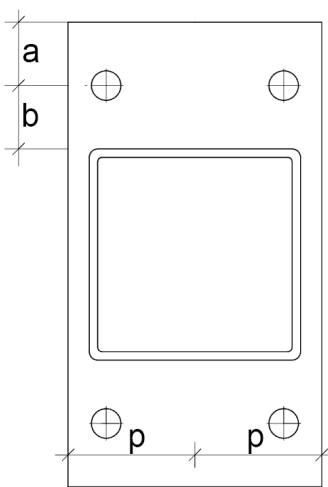
$$\eta_p := \frac{P_r}{R_n}$$

4.1.2 Bemessungsverfahren nach Cidect

Vorbemerkung

In einer 1993 erschienenen Veröffentlichung vom Weltverband der Hohlprofilhersteller (Cidect) [8], wird ein Berechnungsverfahren für Hohlprofil-Stirnplattenanschlüsse vorgestellt. Das hier beschriebene Verfahren bezieht sich auf den im Jahr 2009 von Cidect veröffentlichten „Design Guide 3“ (2. Auflage)[9]. Es können Verbindungen mit Schrauben an zwei oder vier Seiten des Hohlprofils bemessen werden. Im nachfolgenden Text wird auf Anschlüsse mit Schrauben an zwei Seiten des Hohlprofils eingegangen. Eine Beispielrechnung ist im Anhang I zu finden.

Geometrie, Bedingungen und Berechnungsvorwerte



- t_i = Materialstärke des Hohlprofils
- t_p = Stirnplattendicke
- f_{yp} = Streckgrenze der Stirnplatte
- f_{ub} = Zugfestigkeit der Schraube
- d' = Schraubendurchmesser
- N_i = Einwirkende Normalkraft
- n = Schraubenanzahl

Abb. 39 Geometriedefinition

Bedingungen

1. Der maximale Abstand der Schraubenlöcher - Außenkanten darf höchstens der Profilbreite entsprechen. Dieser Grenzfall ist in der oben stehenden Abbildung [39] dargestellt.

Vorwerte

Die Hebelarme a und b werden für die Berechnung angepasst. Somit wird a zu a' , und b zu b' . Die Größe der Anpassung ist abhängig vom Schraubendurchmesser und der Wandungsstärke. In der Berechnung darf a maximal $1,25 \times b$ betragen.

$$a_{\text{eff}} := a < 1,25 \cdot b \qquad a' := a_{\text{eff}} + \frac{d}{2} \qquad b' := b - \left(\frac{d}{2} \right) + t_i$$

Einwirkende Zugkraft je Schraube

$$P_f := \frac{N_i}{n}$$

Sicherheitsbeiwerte

Da das Berechnungsverfahren nach Cidect kein Normen gebundenes Berechnungsverfahren ist, wird kein Teilsicherheitsfaktor für die Schrauben festgelegt. In der hier aufgeführten Beschreibung wird der Teilsicherheitsbeiwert aus der DIN EN 1993-1-8 übernommen.

Sicherheitsbeiwert der Schraube

Grenzzugkraft der Schraube

$$\phi_b := \frac{0.9}{\gamma_{M2}} = 0.72$$

$$T := A_s \cdot F_{ub} \cdot \phi_b$$

Der Sicherheitsfaktor für die Stirnplatte ϕ_p wird von Cidect mit 0,9 angegeben.

$$\phi_p := 0.9$$

Berechnung

Beim Berechnungsverfahren nach Cidect wird eine minimale und maximale Stirnplattendicke ermittelt zwischen denen eine Plattendicke festgelegt werden darf. Mit der gewählten Dicke berechnet sich dann die Schraubenbeanspruchung. Nach Cidect Schreibweise der Formeln ist schlecht ersichtlich auf welchen theoretischen Ansätzen die Berechnung beruht. Um die Grundmechanismen darstellen zu können wird eine alternative Schreibweise der Berechnung gewählt.

Festlegung der Plattendicke (alternative Schreibweise)

Die Festlegung der Plattendicke, verhindert ein vorzeitiges Plattenversagen beziehungsweise eine größere plastische Verformung der Stirnplatte.

Plastische Widerstandsmomente der Stirnplatte

Bei der Ermittlung des plastischen Widerstandsmomentes in der Schraubenebene ($M_{Pl,1}$) wird die Querschnittsschwächung durch die Schraubenlöcher berücksichtigt.

$$M_{pl,1} := \frac{t_p^2 \Phi_p \cdot (2 \cdot p - 2d') \cdot f_{y,p}}{4}$$

Beim plastischen Widerstandsmoment der Stirnplatte im Flanschbereich ($M_{Pl,2}$) wird die volle Plattenbreite angesetzt. Beide Widerstandsmomente werden mit dem Teilsicherheitsbeiwert Φ_p abgemindert.

$$M_{pl,2} := \frac{t_p^2 \Phi_p \cdot (2 \cdot p) \cdot f_{y,p}}{4}$$

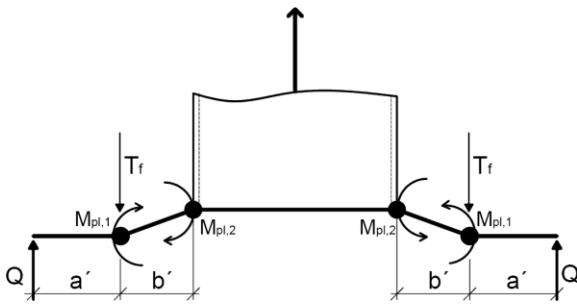
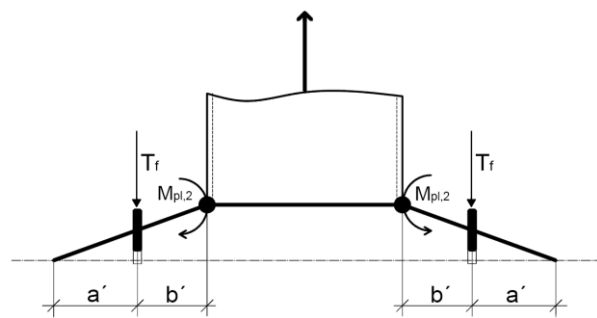
Minimale StirnplattendickeMaximale Stirnplattendicke

Abb. 40 Statische Ersatzmodelle für den Versagensmodus Plattenversagen

Bei der Berechnung mit der minimalen Stirnplattendicke sind Abstützkräfte vorhanden. Infolgedessen bilden sich vier Fließgelenke aus.

Bei der Berechnung mit der maximalen Stirnplattendicke wird davon ausgegangen, dass aufgrund der hohen Schraubendehnung keine Abstützkräfte entstehen. Somit bilden sich nur zwei Fließgelenke aus.

Grenzzugkräfte bei Plattenversagen

$$N_{tp.min} := 2 \frac{M_{pl.1} + M_{pl.2}}{b'}$$

$$N_{tp.max} := \frac{2 \cdot M_{pl.2}}{b'}$$

Nach umstellen der Formeln nach t_p (Stirnplattendicke) erhält man die minimale und maximale Stirnplattendicke. Dabei ist N_i die einwirkende Zugkraft.

$$t_{p.min.} := \sqrt{\frac{N_i \cdot b'}{0.9(p - d' + p) \cdot f_{y.p}}}$$

$$t_{p.max.} := \sqrt{\frac{N_i \cdot b'}{0.9p \cdot f_{y.p}}}$$

Festlegung der Plattendicke (Schreibweise nach Cidect)

Berechnungsvorwerte

$$\delta := 1 - \frac{d'}{p}$$

$$P_f := \frac{N_i}{n}$$

$$K := \frac{4 \cdot b'}{0.9 \cdot f_{y.p} \cdot p}$$

minimale Stirnplattendicke

$$t_{p.min} := \sqrt{\frac{K \cdot P_f}{1 + \delta}}$$

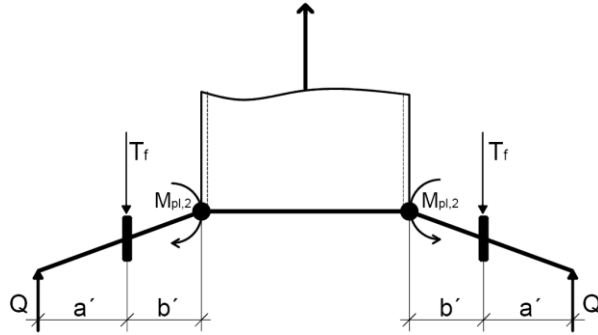
maximale Stirnplattendicke

$$t_{p.max} := \sqrt{K \cdot P_f}$$

Schraubenbemessung

Bei der Schraubenzugkraft werden zwei Auslastungen angegeben. Zum einen die Grenzzugkraft der Verbindung, zum anderen die Schraubenzugkraft unter der einwirkenden Belastung.

Schraubenversagen unter Abstützkräften (alternative Schreibweise)



Beim Schraubenversagen wird davon ausgegangen, dass sich zwei Fließgelenke im Flanschbereich der Stirnplatte ausbilden.

Abb. 41 Statisches Ersatzmodell für den Versagensmodus Schraubenversagen unter Abstützkräften

Grenzzugkraft der Verbindung
(Schraubenversagen)

$$N_{i.S.} := \left[\frac{1}{a' + b'} \cdot (a' \cdot T + \Phi_p M_{pl}) \right] \cdot n$$

Schraubenzugkraft unter vorherrschender Belastung

$$T_f := \frac{1}{a'} \cdot [(a' + b') \cdot P_f - \Phi_p M_{pl}]$$

Schraubenversagen unter Abstützkräften (Schreibweise nach Cidect)

Grenzzugkraft der Verbindung
(Schraubenversagen)

$$\alpha := \left(\frac{K \cdot T}{t_p^2} - 1 \right) \cdot \left[\frac{a + \left(\frac{d}{2} \right)}{\delta \cdot (a + b + t_i)} \right]$$

Schraubenzugkraft unter vorherrschender Belastung.

$$\alpha := \left(\frac{K \cdot P_f}{t_p^2} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\delta}$$

$$N_{i.S.} := \frac{t_p^2 (1 + \delta \cdot \alpha) \cdot n}{K}$$

$$T_f := P_f \cdot \left[1 + \frac{b'}{a'} \cdot \left(\frac{\delta \cdot \alpha}{1 + \delta \cdot \alpha} \right) \right]$$

$$\eta := \frac{N_i}{N_{i.S.}}$$

$$\eta := \frac{T_f}{T}$$

Momentenbeanspruchbarkeit

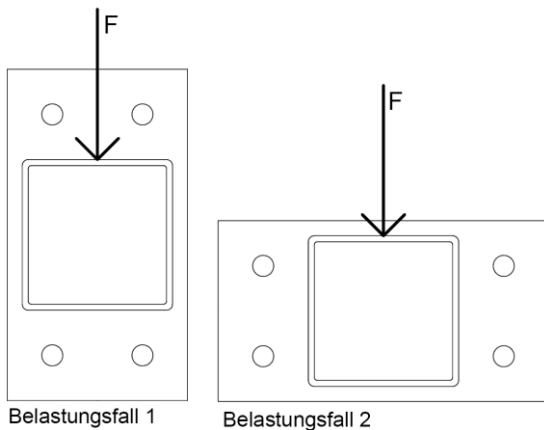


Abb. 42 Mögliche Belastungsrichtungen

$$N_{\text{eff}} := \left(\frac{N_i}{A_i} + \frac{M_i}{W_i} \right) \cdot A_i$$

N_i = einwirkende Normalkraft

M_i = einwirkendes Moment

A_i = Querschnittsfläche

W_i = Widerstandsmoment

Die Momentenbeanspruchbarkeit wird mit Hilfe einer Ersatznormalkraft (N_{eff}) berechnet, die anstelle von N_i einzusetzen ist. Auch eine Überlagerung von M und N ist möglich. Dabei ist die Belastungsrichtung des Momentes nicht festgelegt (siehe Abbildungen 42). Dadurch dass die Momentenbeanspruchbarkeit für beide Belastungsrichtungen gleich ist, wird die Belastbarkeit für den Belastungsfall 1 unterschätzt. Im Cidect „Design Guide 3“ [9] wird darauf hingewiesen, dass die Berechnung der Momententragfähigkeit eine konservative Näherung ist. Eine Momentenbelastung mit seitlicher Schraubenanordnung wird in keinem anderen Berechnungsverfahren berücksichtigt.

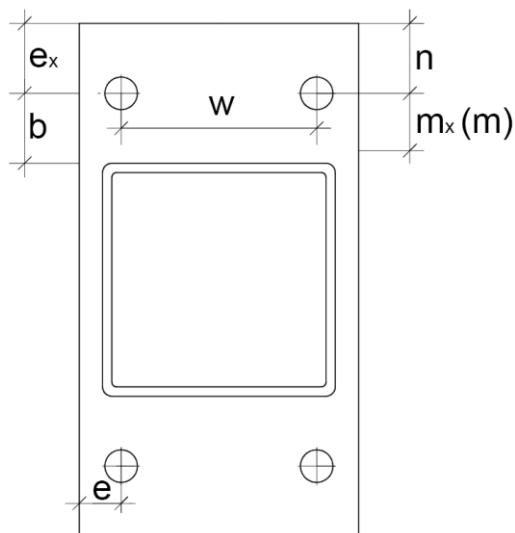
4.1.3 Bemessungsverfahren nach DIN EN 1993-1-8

Vorbemerkung

Der im Jahr 2012 eingeführte Eurocode beinhaltet auch ein neues Bemessungsverfahren für Stirnplattenanschlüsse. Eine Verwendung des Berechnungsverfahrens für Hohlprofilanschlüsse wird nicht explizit erwähnt. Auf der Seite 69 der DIN EN 1993-1-8 ist folgende Anmerkung zu finden „Die in dieser Norm angegebenen Berechnungsverfahren für Grundkomponenten sind allgemein gültig und können auf ähnliche Komponenten in anderen Anschlusskonfigurationen übertragen werden. Allerdings beruhen die hier angegebenen Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Momententragfähigkeit, der Rotationssteifigkeit und der Rotationskapazität eines Anschlusses auf einer Verteilung der inneren Kräfte und Momente, die zu den in Bild 1.2 dargestellten Anschlusskonfigurationen gehört. Bei anderen Anschlusskonfigurationen sind die Berechnungsverfahren zur Bestimmung von Momententragfähigkeit, Rotationssteifigkeit und Rotationskapazität an die dafür zutreffende Verteilung der inneren Kräfte und Momente anzupassen.“ (DIN EN 1993-1-8 S.69).

Hinweis: Es ist nicht gesichert, das mit diesem Berechnungsalgorithmus eine ausreichende Sicherheit gewährleistet werden kann. Das Verfahren wird hier beschrieben da es auch in den Vergleichsberechnungen in Kapitel 4.2 aufgeführt ist. Eine Beispielrechnung ist im Anhang J zu finden.

Geometrie, Bedingungen und Berechnungsvorwerte



t_{RHS} = Materialstärke des Hohlprofils
 h_{RHS} = Höhe des Hohlprofils
 b_p = Stirnplattenbreite
 t_f = Stirnplattendicke
 f_{yp} = Streckgrenze der Stirnplatte
 $F_{t,Rd}$ = Zugfestigkeit der Schraube
 d = Schraubendurchmesser
 d_0 = Lochdurchmesser

Abb. 43 Geometriedefinition

Bedingungen

1. Der Schraubenabstand (w) darf maximal der Trägerbreite entsprechen.
2. Die Schweißnaht sollte nicht die höchst ausgelastete Verbindungskomponente sein.

Bestimmung der effektiv mitwirkenden Breite des T - Stummels

Im Eurocode wird für jede Schraubereihe eine rechnerische Einflussbreite ermittelt. Diese muss nicht mit der geometrischen Breite übereinstimmen. Für Hohlprofile wird der Fall äußere Schraubenreihe neben den Trägerzugflansch maßgebend (nicht ausgesteifter Bereich). Bei dieser Schraubenanordnung wird die rechnerische Einflussbreite nie größer als die geometrische Stirnplattenbreite. In der unterstehenden Tabelle ist die Einflussbreite je Schraube angegeben.

Für die Ermittlung der Einflussbreite wird b zu m_x .

$$m_x := b - 0.8 \cdot a_w \cdot \sqrt{2}$$

Lage der Schraubenreihe	Schraubenreihe einzeln betrachtet		Schraubenreihe als Teil einer Gruppe von Schraubenreihen	
	Kreisförmiges Muster $\ell_{\text{eff,cp}}$	Nicht kreisförmiges Muster $\ell_{\text{eff,nc}}$	Kreisförmiges Muster $\ell_{\text{eff,cp}}$	Nicht kreisförmiges Muster $\ell_{\text{eff,nc}}$
Äußere Schraubenreihe neben Trägerzugflansch	der kleinste Wert von: $2\pi m_x$ $\pi m_x + w$ $\pi m_x + 2e$	der kleinste Wert von: $4m_x + 1,25e_x$ $e + 2m_x + 0,625e_x$ $0,5b_p$ $0,5w + 2m_x + 0,625e_x$	—	—

Tab. 7 Auszug aus Tabelle 6.6 Wirksame Längen für Stirnbleche [C2], S. 90, Tabelle 6.6

$$l_{\text{eff.1}} := \text{wenn}(l_{\text{eff,nc}} \leq l_{\text{eff,cp}}, l_{\text{eff,nc}}, l_{\text{eff,cp}}) \quad l_{\text{eff.2}} := l_{\text{eff,nc}}$$

Grenzzugkraft des T – Stummels

In der DIN EN 1993 1-8 wird zwischen drei statischen Ersatzmodellen unterschieden. Mithilfe der drei Ersatzmodelle wird die maximale Flanschzugkraft der Schraubenreihe ermittelt, wobei die geringste Zugkraft maßgebend wird.

Plastisches Widerstandsmoment der Platte

Mit der ermittelten effektiven Breite wird das plastische Widerstandsmoment der Platte bestimmt.

$$M_{\text{pl.1.Rd}} := 0.25 \cdot t_f^2 \cdot l_{\text{eff.1}} \cdot \frac{f_{y,p}}{\gamma_{M0}} \quad M_{\text{pl.2.Rd}} := 0.25 \cdot t_f^2 \cdot l_{\text{eff.2}} \cdot \frac{f_{y,p}}{\gamma_{M0}}$$

Überprüfung auf Abstützkräfte

Eine Überprüfung auf Abstützkräfte wird in diesem Kapitel nicht durchgeführt. Hinweise zu diesem Thema finden sich im Kapitel 3.1.3 auf Seite 23.

Grenzzugkraft der Flansche

Die Berechnung der Grenzzugkraft erfolgt mit angepassten Hebelarmen (m , n).

$$m_{\cdot} := m_{\cdot X}$$

$$n := \text{wenn}(e_X \leq 1.25 \cdot m_{\cdot}, e_X, 1.25 \cdot m_{\cdot})$$

Versagensmodus 1

Im theoretischen Versagensmodus 1 versagt die Stirnplatte. Dieser Versagensmodus stellt vor allen die Gebrauchstauglichkeit der Verbindung sicher. Aufgrund des plastischen Umformvermögens der Stirnplatte ist ein Versagen dieser nicht üblich. Im Regelfall versagt die Schraubenverbindung. Bis zum Versagen der Schraubenverbindung verformt sich die Stirnplatte plastisch was große Verformungen zur Folge hat.

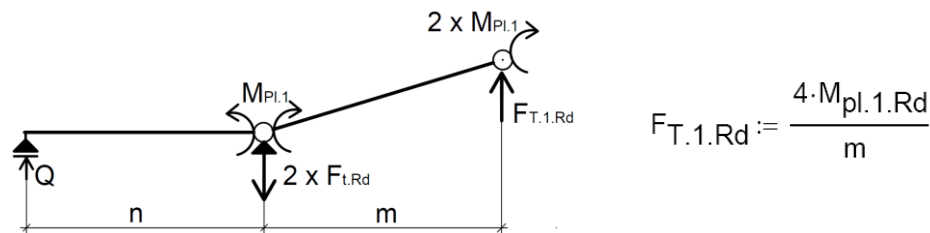


Abb. 44 Statisches Ersatzmodell im Versagensmodus Plattenversagen mit Abstützkräften

Q = Abstützkraft

$F_{t,Rd}$ = Grenzzugkraft Schraube

$F_{T,Rd1}$ = Grenzzugkraft Flansch

Versagensmodus 2

Im Versagensmechanismus 2 wird das Schraubenversagen unter Berücksichtigung der Abstützkräfte Q untersucht. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Stirnplatte am Trägerflansch ein Fließgelenk ausbildet. Die Abstützkräfte führen zu einer Erhöhung der Schraubenkraft.

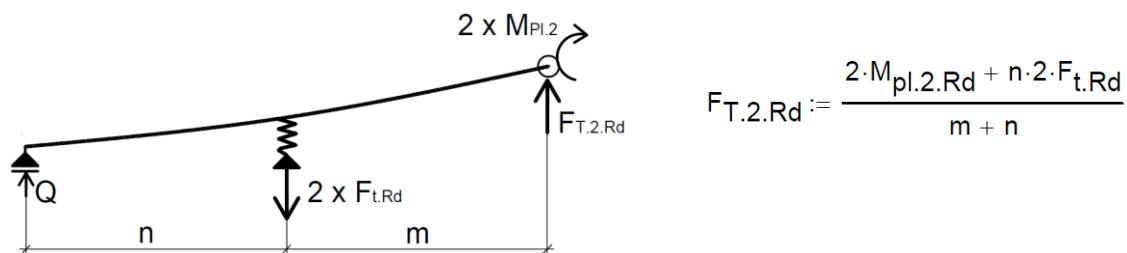


Abb. 45 Statisches Ersatzmodell im Versagensmodus Schraubenversagen mit Abstützkräften

Versagensmodus 3

Versagensmechanismus 3 tritt bei verhältnismäßig dicken Stirnplatten auf. Es handelt sich um reines Schraubenversagen ohne Abstützkräfte. Dieser Modus wird notwendig da im Modus 2 bei dicken Stirnplatten formelbedingt Grenzzugkräfte ermittelt werden, die über der Grenzzugkraft der Schrauben liegen.

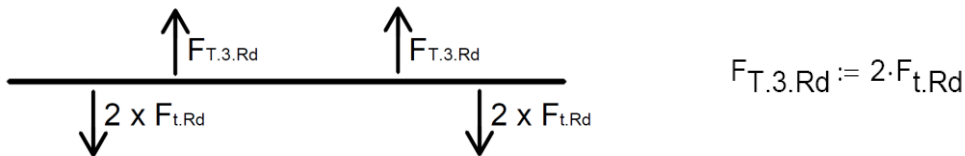


Abb. 46 Statisches Ersatzmodell im Versagensmodus Schraubenversagen ohne Abstützkräften

Zulässige Flanschzugkraft

Die kleinste Grenzzugkraft wird maßgebend! $F_{Rd.1} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd})$

Normalkraft - Tragfähigkeit

Die Zugtragfähigkeit ermittelt sich aus der Summe der maßgebenden Grenzzugkräfte der Flansche.

$$N_{Rd} := 2 \cdot F_{Rd.1} \qquad \eta_N := \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}}$$

Momententragfähigkeit

Die Momententragfähigkeit des Anschlusses ergibt sich aus der maßgebenden Grenzzugtragfähigkeit des Flansches multipliziert mit dem in Abbildung 47 gezeigten Hebelarm.

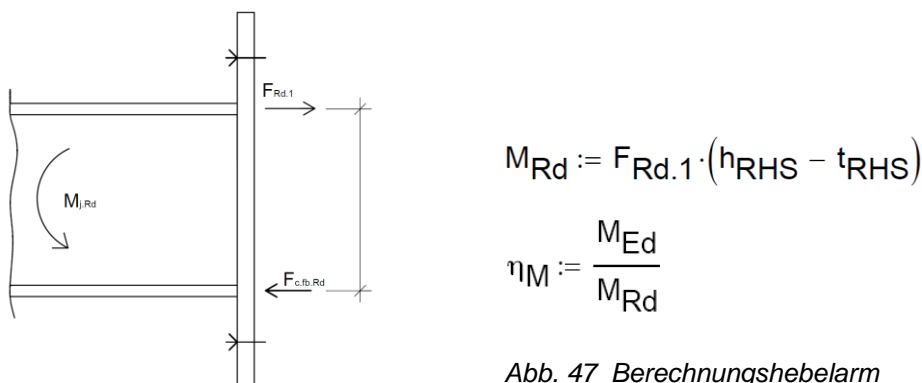


Abb. 47 Berechnungshebelarm

Überlagerung von Momenten- und Normalkraftbeanspruchung

Die Auslastung ergibt sich aus der linearen Überlagerung von M und N.

$$\eta_V := \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}}$$

4.2 Gegenüberstellung von Stirnplatten Berechnungsverfahren

Vorbemerkung

In den folgenden Beispielen werden die ermittelten Normalkrafttragfähigkeiten für das Berechnungsverfahren nach AISC, EC 3 und Cidect in Abhängigkeit zur Stirnplattendicke dargestellt. In den einzelnen Vergleichen wird stets nur die Stirnplattendicke verändert. Die Beispielanschlüsse werden so gewählt das in den meisten Fällen Stirnplatten- oder Schraubenversagen maßgebend wird. Dies hat zur Folge, dass Schweißnähte, Schrauben und Profil für geringe Plattendicken überdimensioniert sind. Da diese Parameter auch Einfluss auf die ermittelten Grenztragfähigkeiten haben, kommt es bei einer angepassten Dimensionierung zu abweichenden Ergebnissen. Da die Berechnungsverfahren nicht normengebunden sind oder auf unterschiedliche Normen basieren, wird die graphische Auswertung der Vergleich mit und ohne Teilsicherheitsbeiwerten vorgenommen. Im Anhang H bis J sind die Berechnungsverfahren mit den Zahlenwerten für Vergleich 3 hinterlegt (mit Teilsicherheitsbeiwerten).

Übersicht der Sicherheitsfaktoren

Berechnungsverfahren	EC 3	Cidect	AISC
Φ Platte	1,0	0,9	1,0
Φ Schraube	0,72	0,72	0,9

Tab. 8 Teilsicherheitsbeiwerte der Bemessungsverfahren

Für das Berechnungsverfahren nach Cidect wird kein Sicherheitsfaktor für die Schraube angegeben. Für die Vergleiche werden die Schrauben Sicherheitsbeiwerte der DIN EN 1993-1-8 übernommen.

Hinweis zu den Berechnungsverfahren nach Cidect

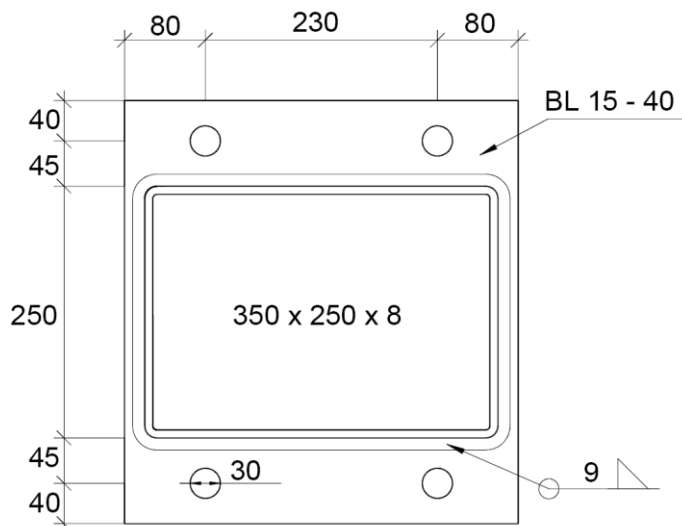
Da beim Berechnungsverfahren nach Cidect zwischen einer minimalen und einer maximalen Stirnplattendicke gewählt werden kann, muss für die Vergleiche ein Kriterium festgelegt werden. Die Berechnungsergebnisse werden für die minimale Stirnplattendicke dargestellt. Dabei wird davon ausgegangen das sich im Versagensmodus Plattenversagen vier Fließgelenke in der Stirnplatte ausbilden können. Dies stellt die maximalen Tragfähigkeiten dieses Verfahrens da.

4.2.1 Vergleich 3

Bei zugbeanspruchten Rechteckquerschnitten ist es sinnvoll die Schrauben an der längeren Profilstirnseite anzuordnen. Die Vorteile sind:

1. Größere mitwirkende Länge der Stirnplatte
2. Gleichmäßigerer Kraftfluss vom Hohlprofil in die Stirnplatte

Geometrien und Materialkennwerte



Stirnplatten - Material

$$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 360 \text{ N/mm}^2$$

Schrauben M 27 10.9

$$f_y = 900 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 1000 \text{ N/mm}^2$$

Schweißnaht

Die Schweißnahtdicke beträgt 9 mm, die Schenkellänge circa 12,7 mm.

Abb. 48 Anschlussgeometrie Vergleich 3

Grenzzugtragfähigkeiten in Abhängigkeit zur Stirnplattendicke mit Teilsicherheitsbeiwerten

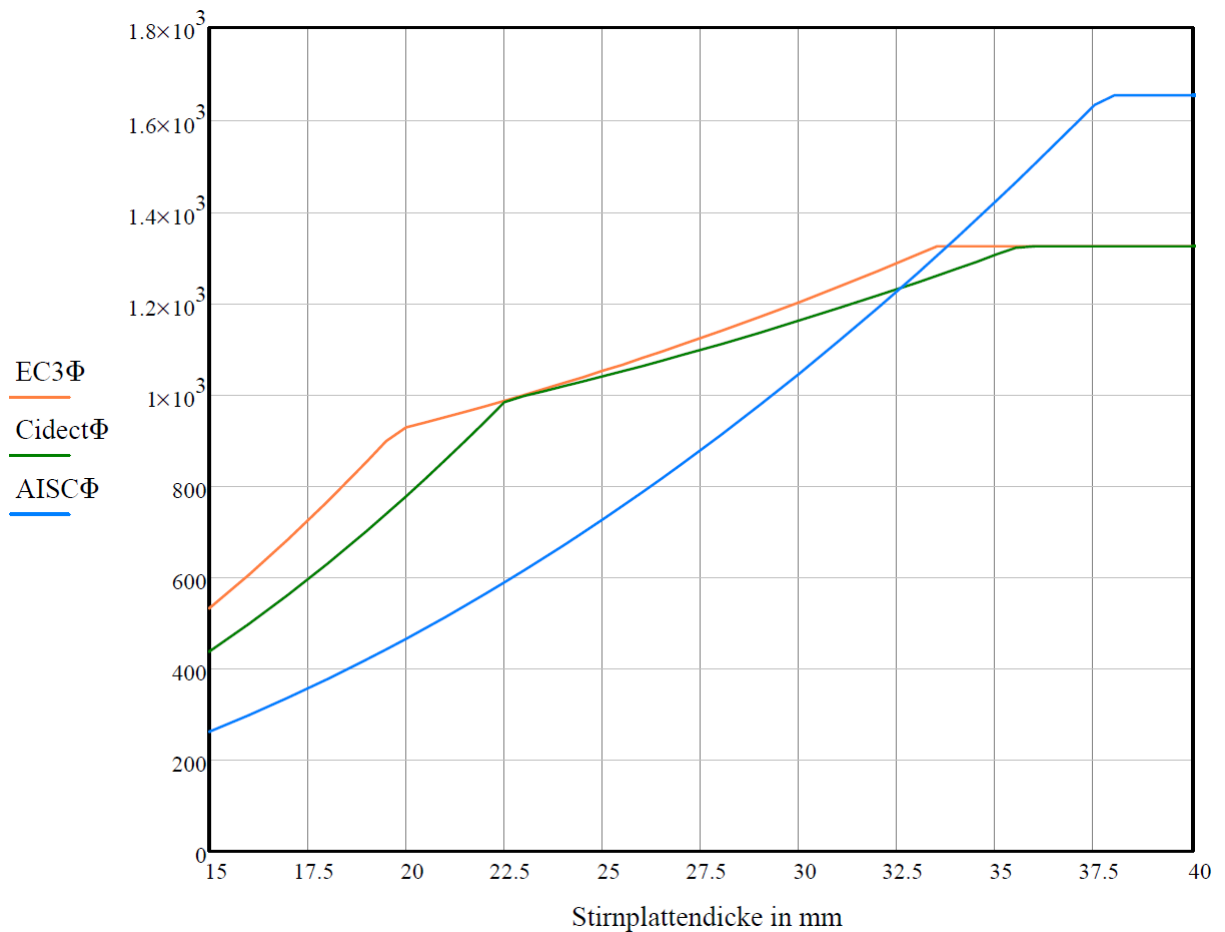


Abb. 49 Grenzzugtragfähigkeiten für Vergleich 3 mit Teilsicherheitsbeiwerten

Theoretische Versagensmodi der einzelnen Verfahren

EC 3Φ

Plattenversagen → Schraubenversagen unter Abstützkräften
 → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

Hinweis

Die rechnerisch angesetzte Stirnplattenbreite ist geringer als die geometrische Stirnplattenbreite.

CidectΦ

Plattenversagen → Schraubenversagen unter Abstützkräften
 → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

AISCΦ

Plattenversagen → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

Grenzzugtragfähigkeiten in Abhängigkeit zur Stirnplattendicke ohne Teilsicherheitsbeiwerten

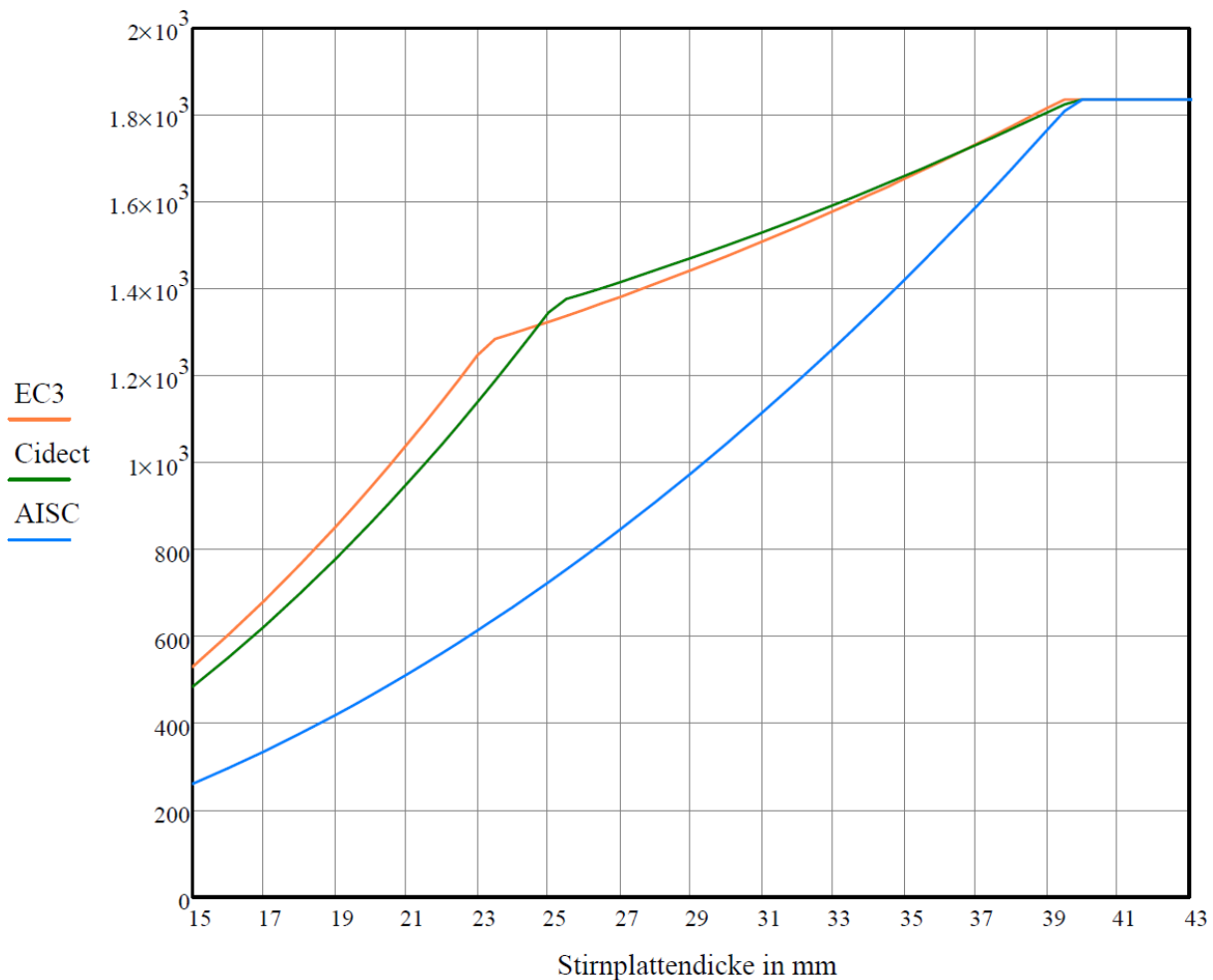


Abb. 50 Grenztragfähigkeiten für Vergleich 3 ohne Teilsicherheitsbeiwerten

Theoretische Versagensmodi der einzelnen Verfahren

EC 3

Plattenversagen → Schraubenversagen unter Abstützkräften
 → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

Hinweis

Die rechnerisch angesetzte Stirnplattenbreite ist geringer als die geometrische Stirnplattenbreite.

Cidect

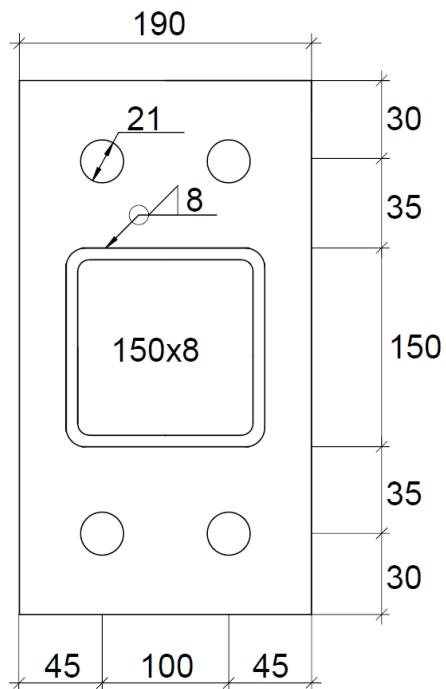
Plattenversagen → Schraubenversagen unter Abstützkräften
 → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

AISC

Plattenversagen → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

4.2.2 Vergleich 4

Geometrien und Materialkennwerte



Stirnplatten - Material

$$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 490 \text{ N/mm}^2$$

Schrauben M 20 10.9

$$f_y = 900 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 1000 \text{ N/mm}^2$$

Schweißnaht

Die Schweißnahtdicke beträgt 8 mm,
die Schenkellänge circa 11,3 mm.

Abb. 51 Anschlussgeometrie Vergleich 4

Grenzzugtragfähigkeiten in Abhängigkeit zur Stirnplattendicke mit Teilsicherheitsbeiwerten

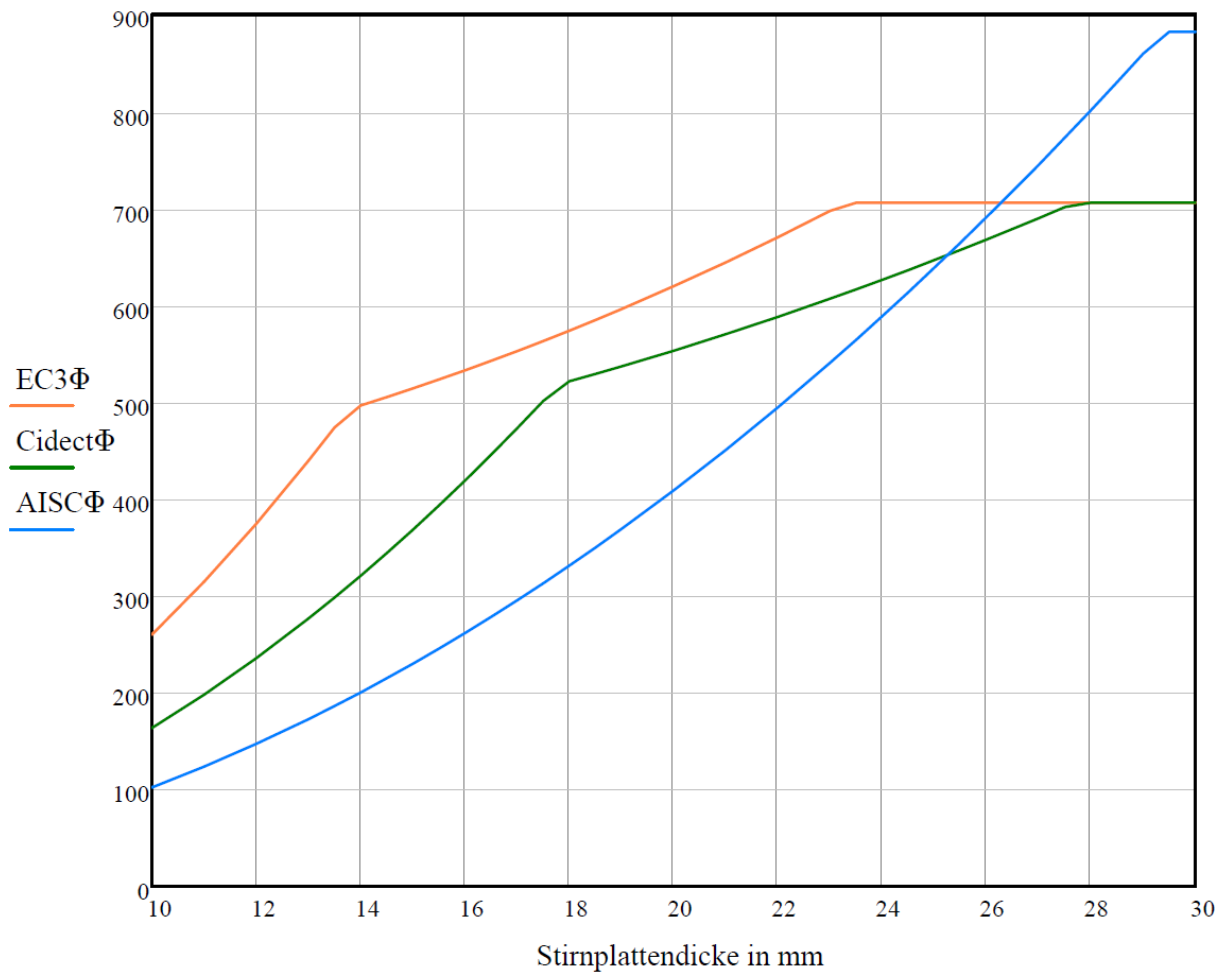


Abb. 52 Grenztragfähigkeiten für Vergleich 4 mit Teilsicherheitsbeiwerten

Theoretische Versagensmodi der einzelnen Verfahren

EC 3Φ

Plattenversagen → Schraubenversagen unter Abstützkräften
 → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

CidectΦ

Plattenversagen → Schraubenversagen unter Abstützkräften
 → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

AISCΦ

Plattenversagen → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

Grenzzugtragfähigkeiten in Abhängigkeit zur Stirnplattendicke ohne Teilsicherheitsbeiwerten

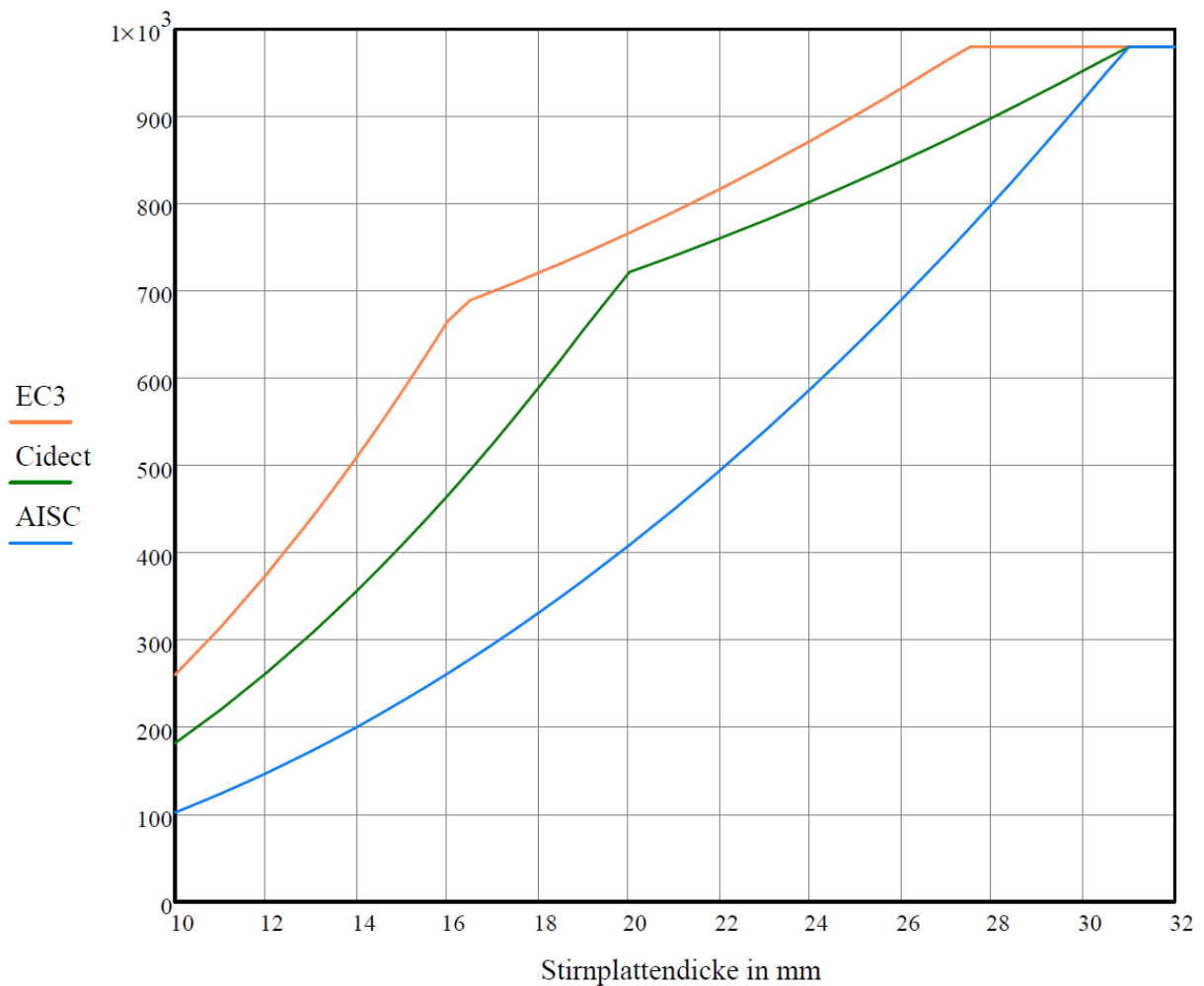


Abb. 53 Grenztragfähigkeiten für Vergleich 4 ohne Teilsicherheitsbeiwerten

Theoretische Versagensmodi der einzelnen Verfahren

EC 3

Plattenversagen → Schraubenversagen unter Abstützkräften
 → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

Cidect

Plattenversagen → Schraubenversagen unter Abstützkräften
 → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

AISC

Plattenversagen → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

4.2.3 Vergleich 5

Im Vergleich 5 wird der Flansch- Schraubenabstand aus Vergleich 4 von 35 mm auf 40 mm erhöht. Die graphische Auswertung erfolgt für beide Geometrien.

Geometrien und Materialkennwerte

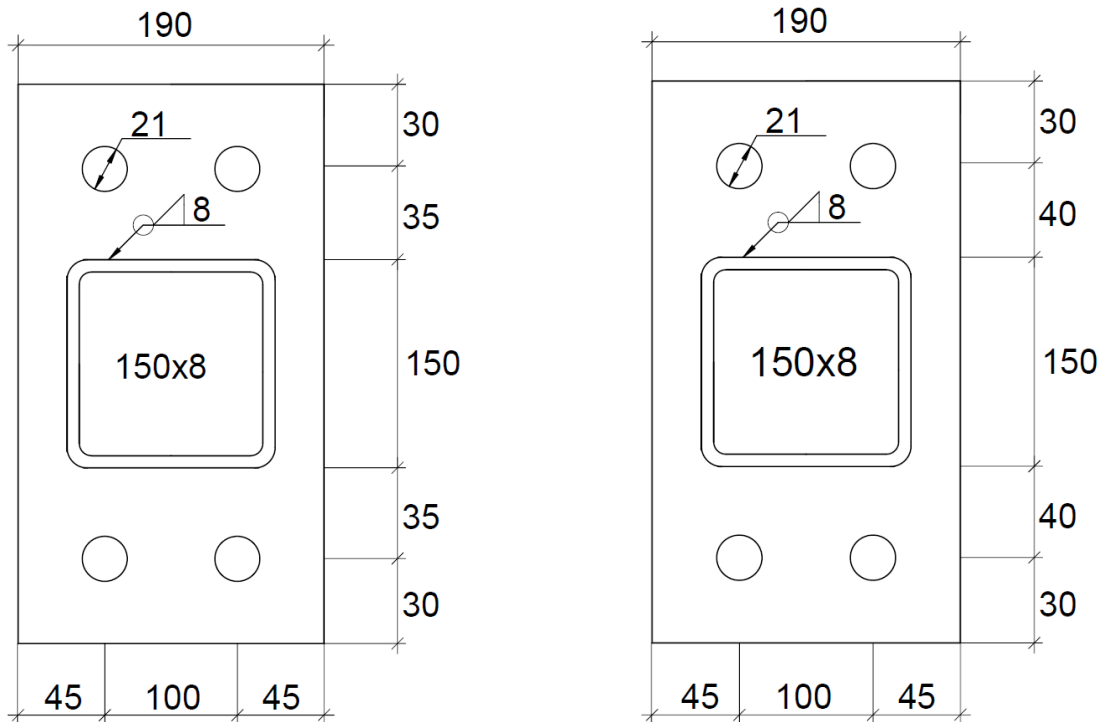


Abb. 54 Anschlussgeometrie Vergleich 5

Stirnplatten - Material

$$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 490 \text{ N/mm}^2$$

Schrauben M 20 10.9

$$f_y = 900 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 1000 \text{ N/mm}^2$$

Schweißnaht

Die Schweißnahtdicke beträgt 8 mm,
die Schenkellänge circa 11,3 mm.

Grenzzugtragfähigkeiten in Abhängigkeit zur Stirnplattendicke mit Teilsicherheitsbeiwerten

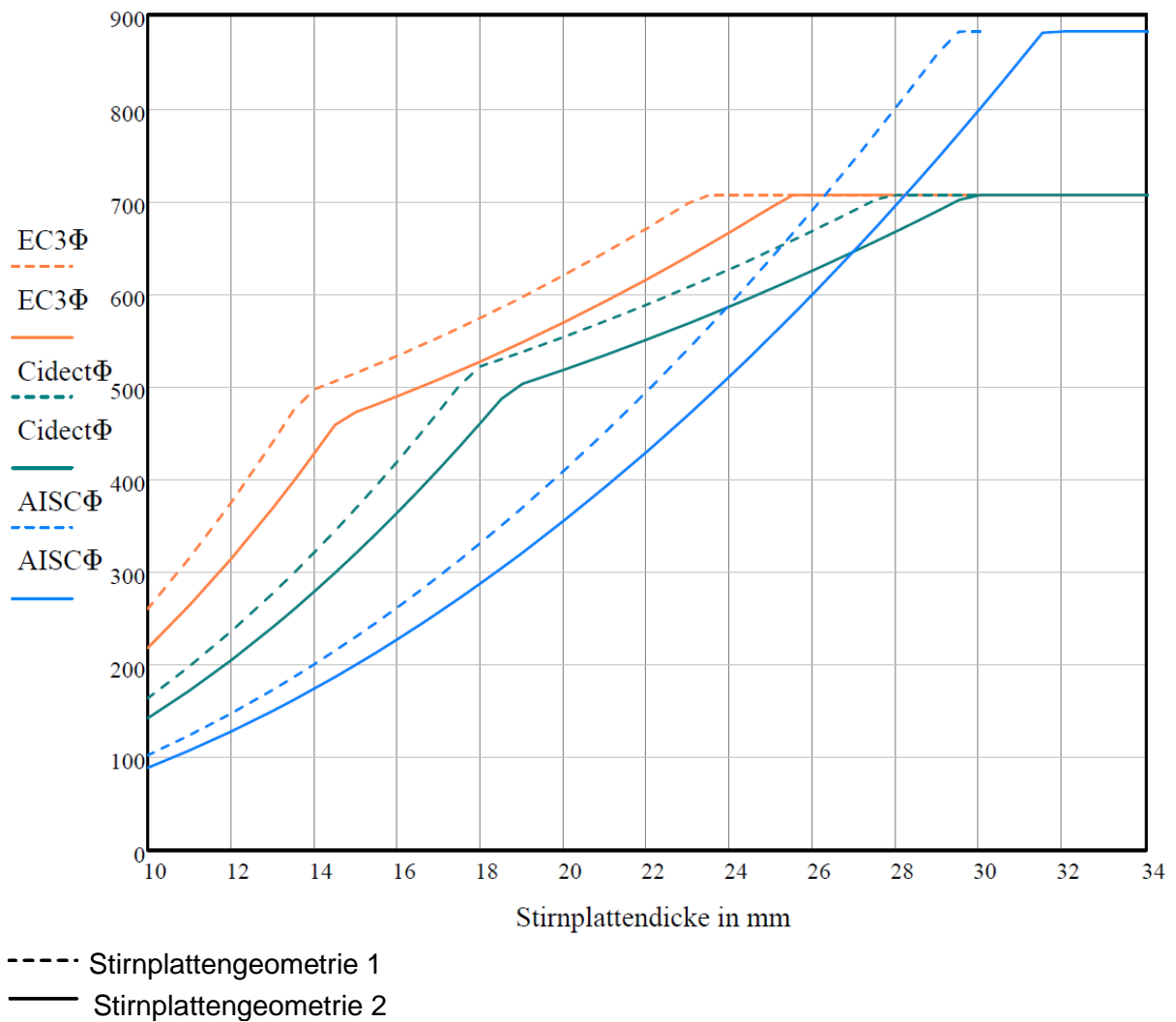


Abb. 55 Grenztragfähigkeiten für Vergleich 5 mit Teilsicherheitsbeiwerten

Theoretische Versagensmodi der einzelnen Verfahren

EC 3Φ

Plattenversagen → Schraubenversagen unter Abstützkräften
 → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

CidectΦ

Plattenversagen → Schraubenversagen unter Abstützkräften
 → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

AISCΦ

Plattenversagen → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

Grenzzugtragfähigkeiten in Abhängigkeit zur Stirnplattendicke ohne Teilsicherheitsbeiwerten

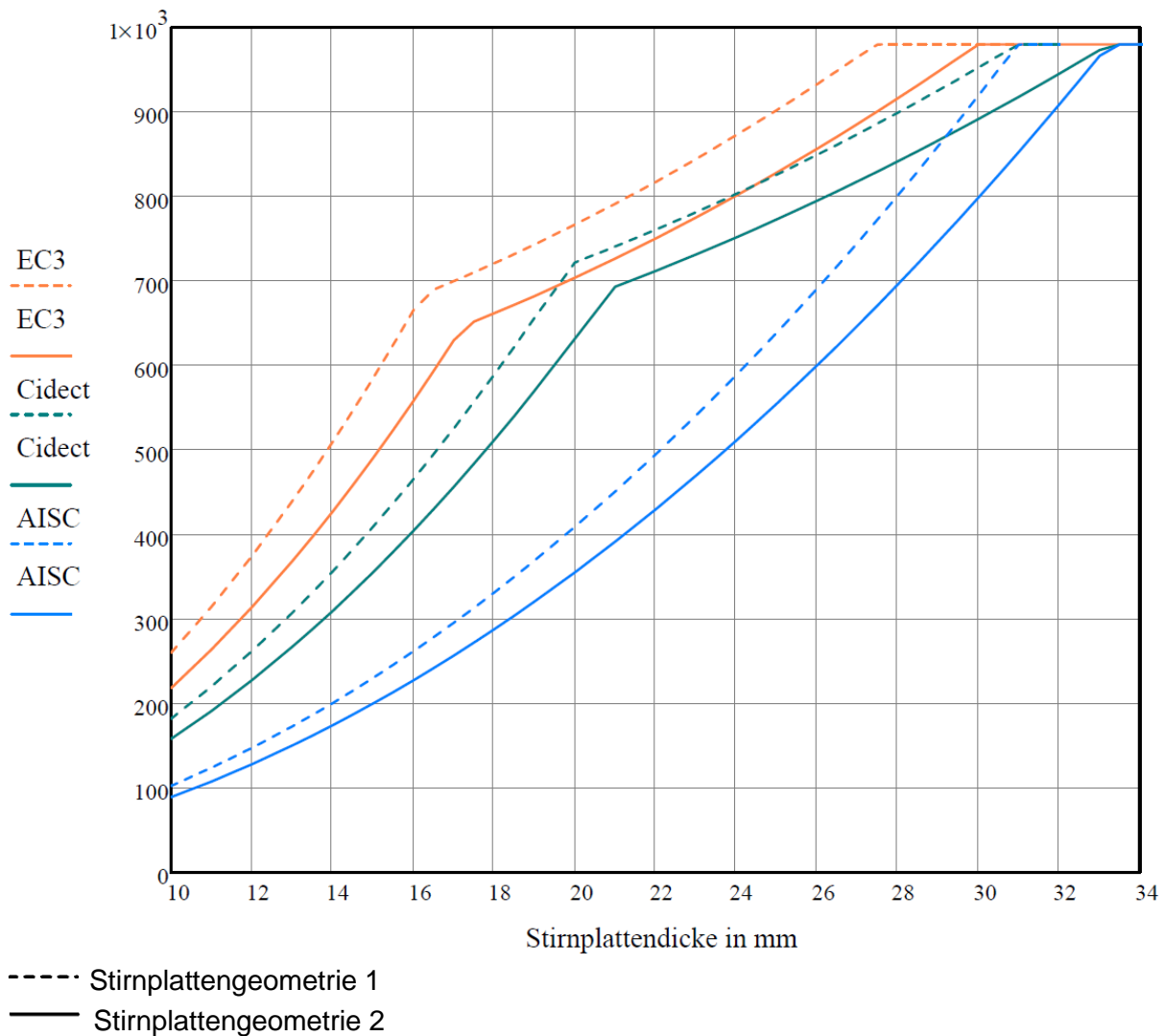


Abb. 56 Grenztragfähigkeiten für Vergleich 5 ohne Teilsicherheitsbeiwerten

Theoretische Versagensmodi der einzelnen Verfahren

EC 3

Plattenversagen → Schraubenversagen unter Abstützkräften
 → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

Cidect

Plattenversagen → Schraubenversagen unter Abstützkräften
 → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

AISC

Plattenversagen → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

4.2.4 Vergleich 6

Im Vergleich 6 wird der Schrauben- Randabstand aus Vergleich 4 von 30 mm auf 40 mm erhöht. Die graphische Auswertung erfolgt für beide Geometrien.

Geometrien und Materialkennwerte

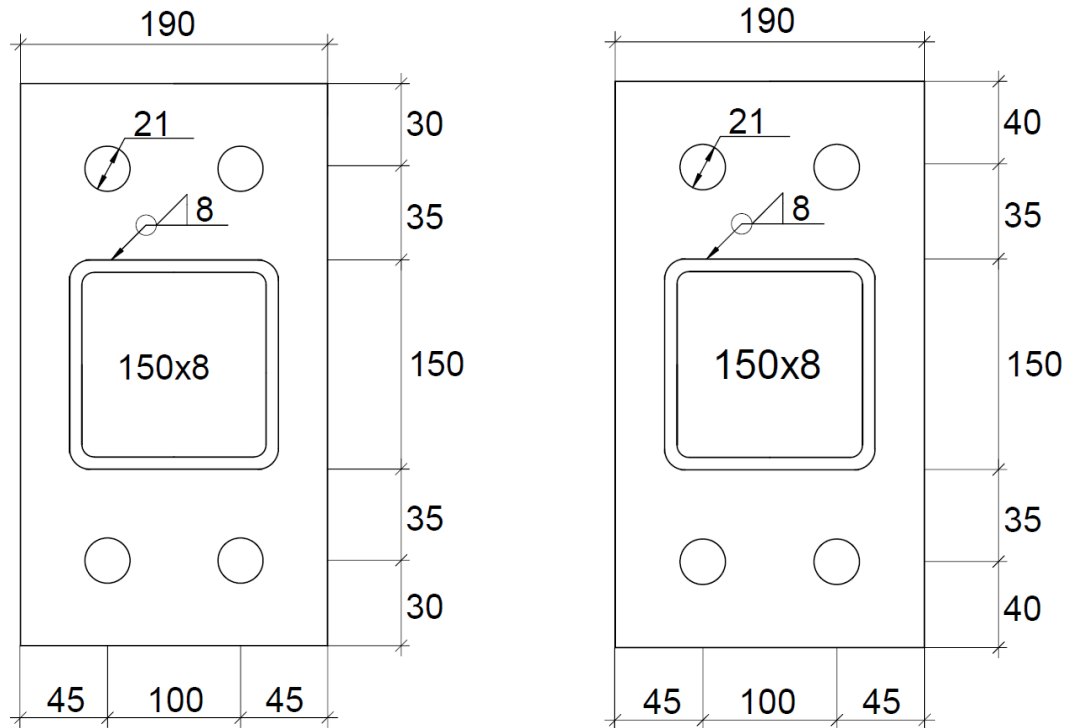


Abb. 57 Anschlussgeometrie Vergleich 6

Stirnplatten - Material

$$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 490 \text{ N/mm}^2$$

Schrauben M 20 10.9

$$f_y = 900 \text{ N/mm}^2$$

$$f_u = 1000 \text{ N/mm}^2$$

Schweißnaht

Die Schweißnahtdicke beträgt 8 mm,
die Schenkellänge circa 11,3 mm.

Grenzzugtragfähigkeiten in Abhängigkeit zur Stirnplattendicke mit Teilsicherheitsbeiwerten

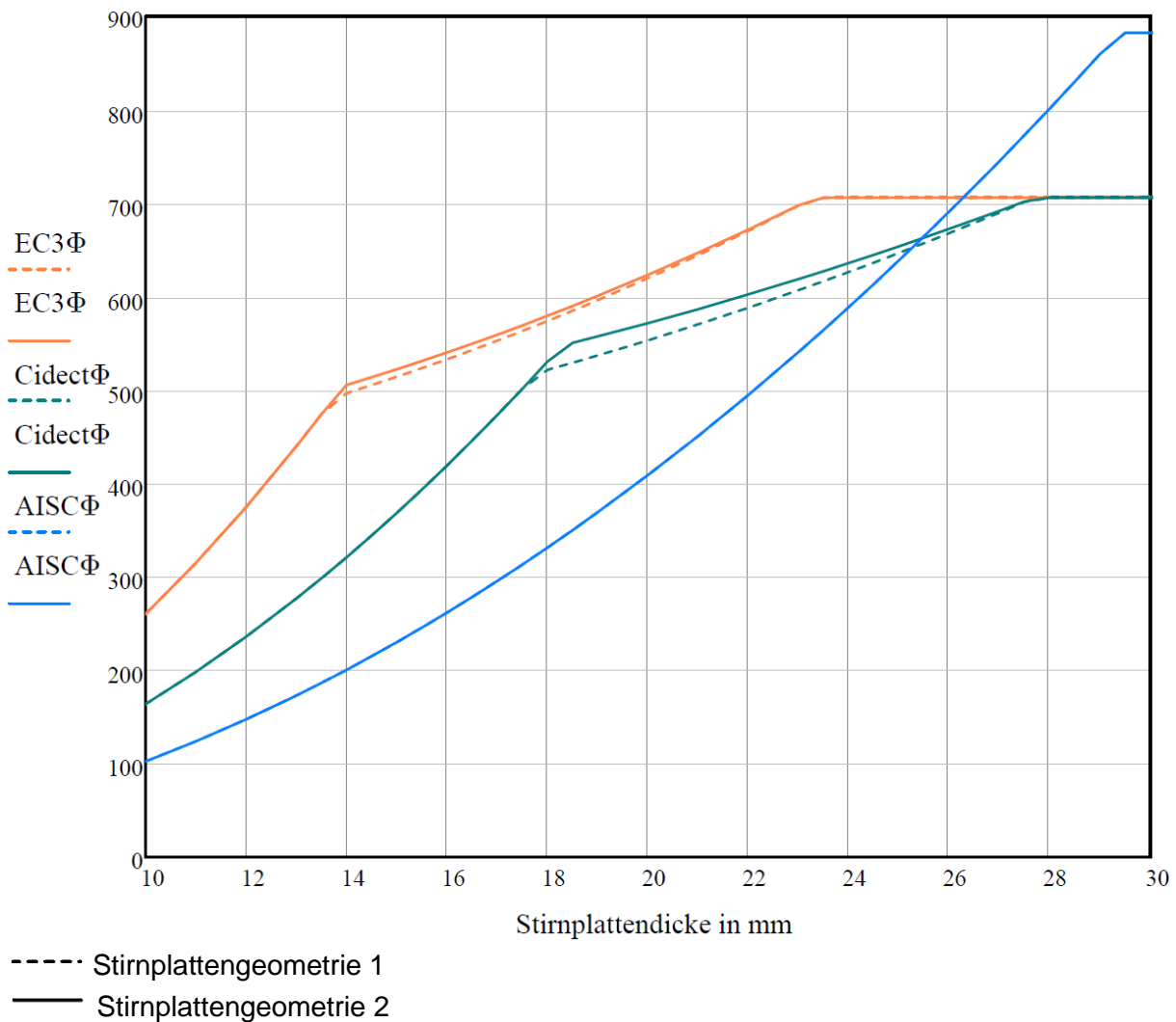


Abb. 58 Grenztragfähigkeiten für Vergleich 5 mit Teilsicherheitsbeiwerten

Theoretische Versagensmodi der einzelnen Verfahren

EC 3Φ

Plattenversagen → Schraubenversagen unter Abstützkräften
 → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

CidectΦ

Plattenversagen → Schraubenversagen unter Abstützkräften
 → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

AISCΦ

Plattenversagen → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

Grenzzugtragfähigkeiten in Abhängigkeit zur Stirnplattendicke ohne Teilsicherheitsbeiwerten

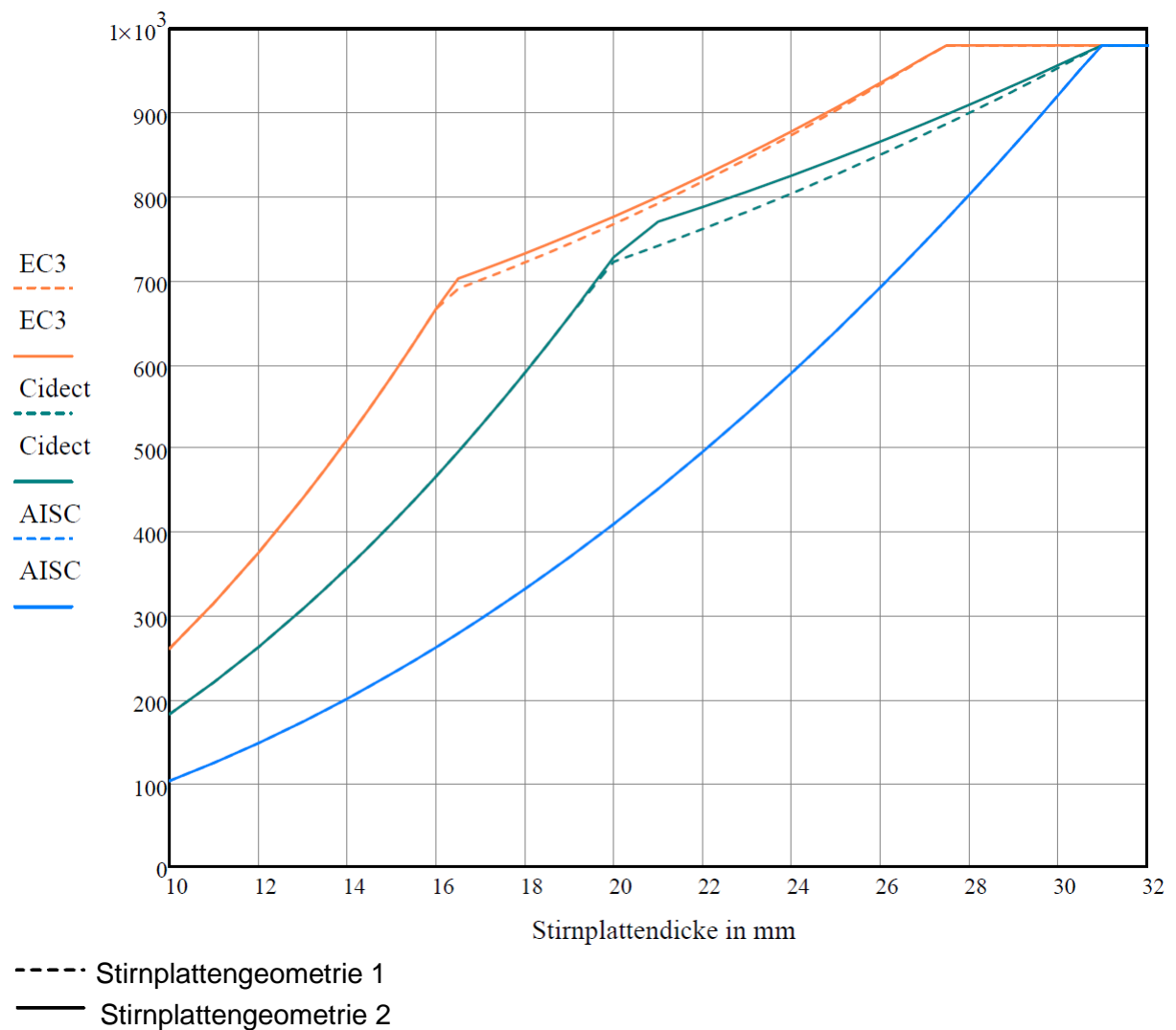


Abb. 59 Grenzzugtragfähigkeiten für Vergleich 5 ohne Teilsicherheitsbeiwerten

Theoretische Versagensmodi der einzelnen Verfahren

EC 3

Plattenversagen → Schraubenversagen unter Abstützkräften
 → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

Cidect

Plattenversagen → Schraubenversagen unter Abstützkräften
 → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

AISC

Plattenversagen → Schraubenversagen ohne Abstützkräften

4.2.5 Gegenüberstellung der Berechnungsverfahren gegen Versuche

Auf den folgenden Seiten werden Versuche aus der Veröffentlichung „Limit Analysis of Bolted RHS Flange Plate Joints“ [14], den Berechnungsverfahren nach AISC, Cidect und EC 3 gegenübergestellt. In der Versuchsreihe wurden zwei und dreireihige Stirnplattenverbindungen untersucht. Dabei wurden vier Versuche an zweireihigen Anschlüssen durchgeführt, die in diesem Dokument zum Vergleich herangezogen werden.

Versuchsaufbau

Die Versuchsverbindung besteht aus einem Stirnplattenstoß welcher auf Zug belastet wurde. Gemessen wurden die Zugkräfte der Verbindung und die Zugkräfte der Schrauben. Aus der Differenz der beiden Werte konnte der Anteil der Schraubenzugkraft infolge von Abstützkräften ermittelt werden. Eine geringfügige Verfälschung ist durch die Kraftmesser der Schrauben zu erwarten, da diese die Schraubenlänge um 24mm erhöhen. Dadurch ist die Dehnlänge der Schraube größer. Die Grenzzugkräfte der Schrauben und die Streckgrenze und Zugfestigkeit der Stirnplatten wurden experimentell ermittelt und sind in der unterstehenden Tabelle aufgeführt.

Berechnungsparameter der Vergleichsrechnung

Die Berechnungen werden mit den experimentell gemessenen Materialkennwerten durchgeführt. Also nicht mit den garantierten Mindestfestigkeiten der Hersteller, die geringere Festigkeitswerte angeben. Des weiterem werden die Berechnungsverfahren ohne Teilsicherheitsbeiwerte gegen die Versuchsergebnisse verglichen.

Versuchsnummer	Streckgrenze der Platte [N/mm ²]	Zugfestigkeit der Platte [N/mm ²]	Grenzzugkraft der Schraube [kN]
LB - 1	300	490	134
LB - 2	287	448	142
LB - 3	275	478	208,5
LB - 9	275	478	208,5

Tab. 9 Gemessene Materialfestigkeiten und Grenzzugkräfte der Schrauben [14]

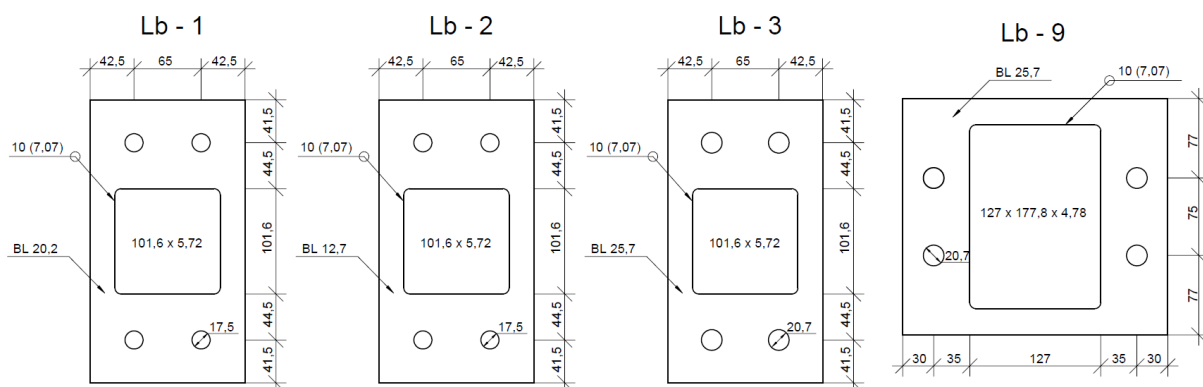


Abb. 60 Geometrien aus den Versuchsverbindungen [14]

Vergleich der Berechnungsverfahren gegen die experimentell ermittelten Grenztragfähigkeiten

Die maximale Kraft gibt die Grenztragfähigkeit der Verbindung an [kN].

Die hinter den Zahlenwerten stehenden Buchstaben zeigen den theoretischen Versagensmodus der Berechnungsverfahren an.

Theoretische Versagensmodi

P = Plattenversagen

S_A = Schraubenversagen unter Abstützkräften

S = reines Schraubenversagen

Bei allen 4 Versuchen wurde Schraubenversagen maßgebend.

Gegenüberstellung

	Versuch	AISC		Cidect		EC 3	
Test-nummer	maximale Kraft T _{ux}	maximale Kraft P _r	P _r /T _{ux}	maximale Kraft N _i	N _i /T _{ux}	maximale Kraft N _{Rd}	N _{Rd} /T _{ux}
LB - 1	443	217 (P)	49%	384(P)	87%	403(S _A)	91%
LB - 2	350	82 (P)	23%	145(P)	41%	190 (P)	54%
LB - 3	622	335 (P)	54%	577(P)	93%	618(S _A)	99%
LB - 9	795	688 (P)	87%	771(S _A)	97%	790 (S _A)	99%

Tab. 10 Gegenüberstellung der Grenztragfähigkeit (maximale Kraft T_{ux} [14])

Abweichung der Berechnungsverfahren zu den Versuchsergebnissen

Verfahren	AISC	Cidect	EC 3
Maximale Abweichung	77%	59%	46%
Durchschnittliche Abweichung	47%	21%	14%

Tab. 11 Gegenüberstellung der Abweichungen zu den Versuchsergebnissen aus [14]

Zusammenfassung der Gegenüberstellung gegen die Versuche

Kein Algorithmus überschätzt die Tragfähigkeit der Anschlüsse. Im Versuch LB - 2 (Abb. 60) fällt auf, dass mit allen Verfahren deutliche geringere Grenztragfähigkeiten ermittelt wurden. Wie in den Beschreibungen schon erwähnt, soll mit dem theoretischen Versagensmodus Plattenversagen vor allem die Gebrauchstauglichkeit des Anschlusses gewährleistet werden. Aus den Versuchen gehen keine Verformungskriterien hervor und können somit nicht beurteilt werden.

4.3 Zusammenfassung

Allgemein

Die Ergebnisse der Gegenüberstellungen weisen erhebliche Spreizungen auf. In den Versuchen 5 und 6 wurden unterschiedliche Stirnplattengeometrien gegenübergestellt. Es können folgende Schlüsse daraus gezogen werden.

1. Der Schrauben-Flanschabstand hat großen Einfluss auf die Grenztragfähigkeiten.
2. Der Schrauben-Randabstand hat nur im Versagensmodus Schraubenversagen Einfluss auf die Grenztragfähigkeiten. Dieser ist gering.
3. Im Gegensatz zum allgemeinen Niveau der Grenztragfähigkeiten, sind die Tragfähigkeitsverschiebungen aufgrund der geänderten Hebelarme gleichartig.

Auswertung der Gegenüberstellung für das Berechnungsverfahren nach Cidect und AISC

In den Gegenüberstellungen der Hohlprofil-Stirnplattenanschlüsse sind die Tragfähigkeiten nach AISC Berechnungsverfahren immer die Geringsten. Grund hierfür ist die Annahme, dass sich im Versagensmodus Stirnplattenversagen nur Fließgelenke im Flanschbereich des Hohlprofils ausbilden.

Die in den Vergleichen angegebenen Belastbarkeiten für den Cidect Algorithmus zeigen die Ergebnisse für die geringsten zulässigen Stirnplattendicken, was den maximalen erreichbaren Tragfähigkeiten dieses Verfahrens entspricht. Im Versagensmodus Plattenversagen wird dabei von Fließgelenken in Flansch und Schraubeneben ausgegangen. Werden die Grenztragfähigkeiten nach Cidect hingegen mit der maximal zulässigen Stirnplattendicke ermittelt, ist festzustellen, dass die Ergebniswerte beider Verfahren identisch sind (ohne Teilsicherheitsbeiwerte). Die Algorithmen nach AISC und Cidect unterscheiden sich für diesen Fall nur in den zur Anwendung kommenden Teilsicherheitsbeiwerten.

Auswertung der Gegenüberstellung für das Berechnungsverfahren nach Cidect und EC 3

Ob eine Bemessung mit dem Berechnungsverfahren nach DIN EN 1993-1-8 auch für Hohlprofilanschlüsse genutzt werden kann ist fraglich. Die Ergebnisse nach EC 3 übersteigen die Grenztragfähigkeiten in den aufgeführten Beispielen erheblich. So werden die Ergebniswerte nach Cidect um bis zu 60% (minimale Stirnplattendicke) und die nach AISC Berechnungsverfahren um bis zu 150% überschritten.

Begründung

Vergleicht man die Grundmechanismen der Verfahren nach Cidect (minimale Stirnplattendicke) und DIN EN 1993-1-8 miteinander, ist festzustellen, dass diese identisch sind. Beide Verfahren gehen im Versagensmodus Plattenversagen von Fließgelenken in Schrauben- und Flanschebene aus. Abweichend sind die Berechnungshebelarme, die anzusetzende Stirnplatten Einflussbreite und der Stirnplatten Sicherheitsbeiwert.

Nach DIN EN 1993-1-8 wird eine Voruntersuchung für die anzusetzende Einflussbreite durchgeführt. In dieser wird für viele Plattengeometrien die halbe Stirnplattenbreite ermittelt, so auch in den Vergleichen 4-6. Die anzusetzende Breite nach Cidect ist immer gleich der Plattenbreite. Die Plattenschwächung durch die Schraubenlöcher wird nach Cidect Algorithmus berücksichtigt. Somit ist die rechnerische Momententragfähigkeit der Stirnplatte nach EC 3 im Vergleich zum Cidect Algorithmus oftmals größer. Darüber hinaus wird die Tragfähigkeit der Platte im Cidect Algorithmus mit dem Teilsicherheitsfaktor von 0,9 abgemindert.

Eine weitere abweichende Größe ist der rechnerische Flansch-Schraubenabstand.

Berechnungshebelarme der Verfahren

Angegeben werden die rechnerischen Flansch-Schraubenabstände.

DIN EN 1993-1-8	Cidect	AISC
$m_x := b - 0.8 \cdot a_w \cdot \sqrt{2}$	$b' := b - \left(\frac{d}{2} \right) + t_i$	$b' := b - \frac{d_b}{2} + t$
b = Flansch-Schraubenabstand	b' = Flansch-Schraubenabstand	b' = Flansch Schraubenabstand
a_w = Schweißnahtdicke	d = Schraubendurchmesser	d_b = Schraubendurchmesser
	t_i = Materialstärke des Profils	t = Materialstärke des Profils

Tab. 12 Rechnerischer Flansch-Schraubenabstand der Berechnungsverfahren

Die rechnerischen Flansch-Schraubenabstände nach Cidect sind in den Versuchen 3-6 im Vergleich zu den Hebelarmen nach EC 3 größer.

Bei genauerer Betrachtung ist festzustellen, dass sich dieses Verhältnis auch umkehren kann. Dies ist bei dünnwandigen Profilen und/oder großen Schraubendurchmessern der Fall. Vorausgesetzt die Schweißnahtdicke ist kleiner oder gleich der Materialstärke des Hohlprofils.

Abschließende Bemerkung

Das Berechnungsverfahren nach Cidect basiert auf Versuchen an Hohlprofilen. Somit kann gesagt werden, dass es sich um ein gesichertes Berechnungsverfahren handelt. Insbesondere mit der Anwendung des hohen Schrauben Sicherheitsbeiwertes nach DIN EN 1993-1-8. Für den Anwender ist es zudem nützlich, dass eine Momentenbelastung unabhängig von der Belastungsrichtung und ein dreireihiges Schraubenbild berücksichtigt werden kann. Ein separater Schraubennachweis sollte immer geführt werden, da dieser nicht im Berechnungsverfahren implementiert ist.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die im Kapitel 3 behandelten Stirnplattenanschlüsse an Doppel-T-Trägern liefern plausible praxisrelevante Ergebnisse. Die aufgeführten Berechnungsverfahren, insbesondere der Algorithmus in Anlehnung an „Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau nach DIN EN 1993-1-8“ [13] geben dem Nutzer die Möglichkeit die maximalen rechnerischen Tragfähigkeiten aus der DIN EN 1993-1-8 in Anwendung zu bringen.

Die Gegenüberstellungen der Hohlprofil-Berechnungsverfahren im Kapitel 4.2 zeigt, dass die Ergebnisse erheblichen Spreizungen unterliegen. Während die Abweichungen zwischen den Bemessungsverfahren nach AISC und Cidect plausibel dargestellt werden können, ist eine Bewertung der Abweichungen für das Verfahren nach DIN EN 1993-1-8 nicht möglich. Damit auch ein gesichertes Bemessungsverfahren für Hohlprofil-Stirnplattenanschlüsse nach DIN EN 1993-1-8 zur Verfügung steht, werden Versuche empfohlen. Diese sollten von numerischen Untersuchungen begleitet werden, um Anschluss Geometrien die von den jetzigen Algorithmus Ergebnissen stark abweichen herausfiltern zu können. Diese Anschluss Geometrien sind dann in Versuchen auf ihre Tragfähigkeit zu überprüfen. Diese Vorgehensweise schränkt die entstehenden Kosten ein und verringert den zeitlichen Aufwand. Zum jetzigen Zeitpunkt ist das Berechnungsverfahren nach Cidect der einzige gesicherte Algorithmus der auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten vernünftige Ergebnisse erzielt. Für den Anwender ist es zudem nützlich, dass eine Momentenbelastung unabhängig von der Belastungsrichtung und ein dreireihiges Schraubenbild berücksichtigt werden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] Wagenknecht G.: *Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3 Band 2, 3. Auflage*. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [2] Lohse W.: *Stahlbau 2, 20. Auflage*. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2005.
- [3] Petersen C.: *Stahlbau, 3. Auflage*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1993.
- [4] Eller H.: *Stahlbau Handbuch Band 1, 2. Auflage*. Köln: Stahlbau-Verlags-GmbH, 1982
- [5] Kahlmeyer, E.: *Stahlbau nach DIN 18800(11.90), 2. Auflage*. Düsseldorf : Werner Verlag, 1996
- [6] Kindmann R., Stracke M.: *Verbindungen im Stahlbau, 2. Auflage*. Berlin: Ernst & Sohn, 2009
- [7] Schmidt H., Zwätz R., Bär L., Kathage K., Hüller V., Kammel C., Volz M.: *Ausführung von Stahlbauten, 1. Auflage*. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH, 2012
- [8] Packer J.A., Wardenier J., Kurobane Y., Dutta D., Yeomans N.: *Konstruieren mit Stahlhohlprofilen 3, 1. Auflage*, Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1993.
- [9] Packer J.A., Wardenier J., Zhao X.-L., van der Vegte G.J., Kurobane Y.: *Design Guide 3, 2. Auflage*, LSS Verlag, 2009.
- [10] Packer J.A., Sherman D., Lecce M.: *Steel Design Guide 24, American Institute of Steel Construction*, 2010
- [11] Rudnitzky J., Belz K., Hartmann E.: *Typisierte Verbindungen im Stahlhochbau, 2. Auflage*. Hrsg: Deutscher Stahlbau-Verband DSTV in Zusammenarbeit mit dem deutschen Ausschuß für Stahlbau; Köln: Stahlbau-Verlags-GmbH, 1979
- [12] Sedlacek G., Weynand K., Oerder S., Hüller V.: *Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau, Band 1*. Hrsg: Deutscher Stahlbau-Verband DSTV; Düsseldorf: Stahlbau Verlags- und Service GmbH, 2000.
- [13] Weynand K., Oerder R.: *Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau nach DIN EN 1993-1-8*. Düsseldorf: Stahlbau Verlags- und Service GmbH, 2013.
- [14] Packer J.A., Bruno L., Birkemoe P. C.: Limit Analysis of Bolted RHS Flange Plate Joints. In: *Journal of Structural Engineering / Volume 115 Issue 9 - September 1989*
- [15] Goris, A., *Schneider, Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen*. Köln : Werner Verlag, 19. Auflage, 2010.

Normen

- [C1] DIN EN 1993 1 – 1 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1- 1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau,
- [C2] DIN EN 1993 1 – 8 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1- 8: Bemessung von Anschlüssen
- [C3] DIN EN 1993 1 – 9 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1- 9: Ermüdung, Dezember 2010
- [C4] DIN EN 1993 1 – 9 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1- 10:Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung, Dezember 2010
- [C5] DIN 18800, Teil 1: Stahlbauten Bemessung und Konstruktion,1990
- [C6] DIN 18800, Teil 7: Stahlbauten; Herstellen, Eignungsnachweise zum Schweißen, November 1990

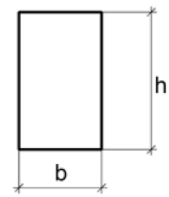
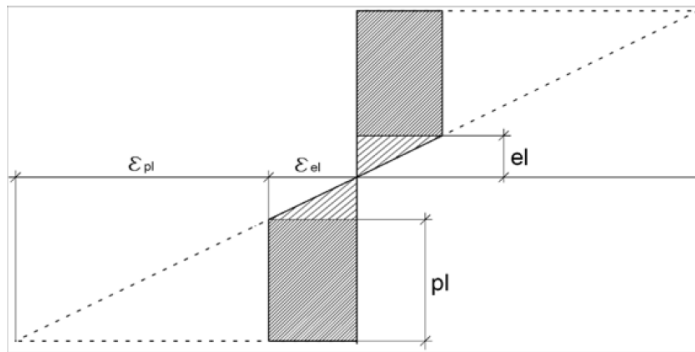
Interentquellen

- [16] Bauforumstahl, zentrale@bauforumstahl.de : *Arbeitshilfe 2.8*. URL:
https://www.bauforumstahl.de/upload/documents/publikationen/arbeitshilfen/Arbeitshilfe_02-08.pdf, 05.01.2017

Programme

- Microsoft Word 2013
- Allplan 2016
- Mathcad 14

Anhang A: Plastisches Widerstandsmoment bei vierfacher elastischer Dehnung



$$h := 25\text{cm}$$

$$b := 15\text{cm}$$

el = elastischer Bereich ($\frac{1}{8} \times h$)

pl = plastischer Bereich ($\frac{3}{8} \times h$)

Statisches Moment bei 4-facher elastischer Dehnung

$$S_{y4} := \left[\frac{3}{8} \cdot h \cdot b \cdot \left(\frac{1}{8} \cdot h + \frac{3}{16} \cdot h \right) + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{8} \cdot h \cdot b \cdot \left(\frac{1}{16} \cdot h \right) \right] = 1.135 \times 10^3 \cdot \text{cm}^3$$

Plastisches Widerstandsmoment bei 4-facher elastischer Dehnung

$$W_{pl4} := 2 \cdot S_{y4} = 2.271 \times 10^3 \cdot \text{cm}^3$$

Vollplastisches Widerstandsmoment

$$W_{pl} := \frac{h^2 \cdot b}{4} = 2.344 \times 10^3 \cdot \text{cm}^3$$

Verhältniss des plastischen Widerstandsmoments bei vierfacher Dehnung zum vollplastischen Moment

$$\frac{W_{pl4}}{W_{pl}} = 96.875\%$$

Bei der vierfachen elastische Dehnung sind bereits fast 97 % des vollplastischen Moments erreicht.

Anhang B: Vergleich der Fließgelenktheorie mit angepassten Ersatzmodell

Streckgrenze Platte

$$f_y := 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

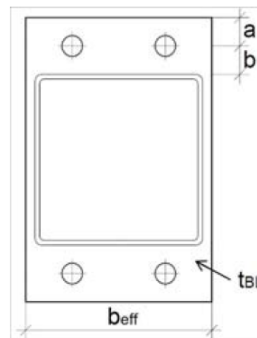
Grenzzugkraft Schraube M16 10.9

$$F_t := 1.57 \text{cm}^2 \cdot 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 157 \cdot \text{kN}$$

Plastisches Widerstandsmoment

$$M_{pl} := \frac{t_p^2 \cdot b_{eff}}{4} \cdot f_y = 470 \cdot \text{kN} \cdot \text{cm}$$

Fließgelenktheorie



$$a := 30 \text{mm}$$

$$b := 30 \text{mm}$$

$$b_{eff} := 200 \text{mm}$$

$$t_p := 20 \text{mm}$$

angepasste Fließgelenktheorie

Flanschzugkraft bei Plattenversagen

$$N_{F.1.a} := \frac{2 \cdot M_{pl}}{b} = 313.333 \cdot \text{kN}$$

$$N_{F.1.b} := \frac{2 \cdot M_{pl}}{b} = 313.333 \cdot \text{kN}$$

Abstützkkräfte bei Plattenversagen

$$Q_{1.a} := \frac{M_{pl}}{a} = 156.667 \cdot \text{kN}$$

$$Q_{1.b} := \frac{M_{pl}}{a} = 156.667 \cdot \text{kN}$$

Flanschzugkraft bei Schraubenversagen

Schraubenkraft bei Plattenversagen

$$F_S := 0.5 M_{pl} \left(\frac{1}{a} + 2 \cdot \frac{1}{b} \right) = 235 \cdot \text{kN}$$

$$\alpha := \frac{F_S}{F_t} = 1.497$$

$$N_{F.2.a} := \frac{2 \cdot M_{pl}}{b \cdot \alpha} = 209.333 \cdot \text{kN}$$

$$N_{F.2.b} := \frac{1}{a + b} \cdot (a \cdot 2 \cdot F_t + M_{pl}) = 235.333 \cdot \text{kN}$$

Abstützkkräfte bei Schraubenversagen

$$Q_{2.a} := 2 \cdot F_t - N_{F.2.a} = 104.667 \cdot \text{kN}$$

$$Q_2 := 2 \cdot F_t - N_{F.2.b} = 78.667 \cdot \text{kN}$$

Maßgebende Flanschzugkräfte

$$N_{F.a} := \min(N_{F.1.a}, N_{F.2.a}) = 209.333 \cdot \text{kN}$$

$$N_{F.b} := \min(N_{F.1.b}, N_{F.2.b}) = 235.333 \cdot \text{kN}$$

Anhang C: Einfluss der Schraubenvorspannkraft unter einer einwirkenden Belastung

Anmerkungen:

- Das Berechnungsmodell geht von einer unendlich biegesteifen Stirnplatte aus, die sich lediglich in Dickenrichtung verformt.
- Das Beispiel wurde so ausgewählt, dass die äußere einwirkende Kraft je Schraube = der Vorspannkraft ist.

Einwirkung

$$N := 343 \text{ kN}$$

äußere einwirkende Kraft je Schraube

$$N_b := \frac{N}{2} = 171.5 \text{ kN}$$

Eingabewerte Schraube M 20 10.9

Schaftquerschnitt $A_{sch} := 3.14 \text{ cm}^2$

Spannungsquerschnitt $A_s := 2.45 \text{ cm}^2$

Scheibendurchmesser $D := 37 \text{ mm}$

Scheibendicke $t := 4 \text{ mm}$

Vorspannkraft $F_{pc} := 171.5 \text{ kN}$

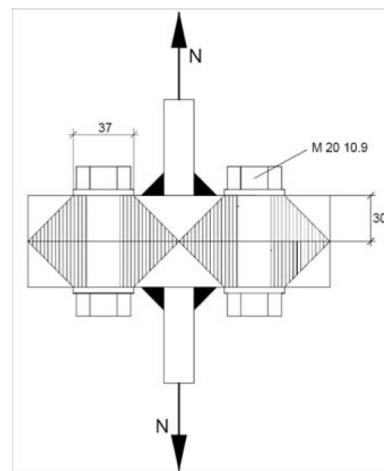
E - Modul $E_s := 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

Eingabewerte Platte

Stirnplattendicke $t_p := 30 \text{ mm}$

E - Modul $E_p := 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

Lochdurchmesser $d_0 := 22 \text{ mm}$



Berechnung

Federsteifigkeit der Schraube

$$c_s := \frac{E_s \cdot A_{sch}}{(2 \cdot t_p + 2 \cdot t)} = 9.697 \times 10^3 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$$

Federsteifigkeit der Platte

$$c_k := \frac{E_p \cdot \frac{\pi}{4}}{\left[\frac{2 \cdot t}{(D^2 - d_0^2)} \right] + \frac{2 \cdot t_p}{(D + d_0)^2 - d_0^2}} = 5.676 \times 10^4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}}$$

Resultierende Schraubenkraft

$$F_{b.res} := \text{wenn} \left(N_b < F_{pc}, F_{pc} + \frac{c_s}{c_s + c_k} \cdot N_b, \frac{c_s}{c_s + c_k} \cdot F_{pc} + N_b \right) = 196.525 \text{ kN}$$

Differenz zur Schraubenvorspannkraft

$$\Delta F_b := F_{b.res} - F_{pc} = 25.025 \text{ kN}$$

Ermüdungsrelevante Spannungsspiel

$$\Delta \sigma_{fat} := \frac{\Delta F_b}{A_s} = 102.145 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} > 36.9 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Eine Dauerfestigkeit ist nach DIN EN 1993 - 1 - 9 nicht gegeben.}$$

**Anhang D: Überstehender Stirnplattenanschluss nach DIN 18800 und [4] in
Anlehnung an "Typisierte Verbindungen im Stahlhochbau, 2. Auflage" (1979) [11]**

Einwirkung

$$M_{Ed} := 239.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Teilsicherheitsbeiwert

$$\gamma_M := 1.1$$

Stirnplatte S 235

Stirnplattendicke

$$d_p := 20 \text{ mm}$$

Stirnplattenbreite

$$b_p := 190 \text{ mm}$$

Schraubenrandabstand in Kraftrichtung

$$e_1 := 35 \text{ mm}$$

Schraubenloch-Flanschabstand

$$a_1 := 50 \text{ mm}$$

Lochdurchmesser

$$d_L := 25 \text{ mm}$$

Anzahl der vertikalen Schraubenreihen

$$n := 2$$

Träger IPE 450

Höhe Träger

$$h_t := 450 \text{ mm}$$

Trägerflanschdicke

$$t_t := 14.6 \text{ mm}$$

Flanschnahtdicke

$$a_{fl} := 11 \text{ mm}$$

Streckgrenze

$$f_y := 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Bemessungsstreckgrenze} \quad \sigma_{Rd} := \frac{f_y}{\gamma_M} = 21.818 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Nachweis der Verbindung

wirksamer Hebelarm c_1

$$c_1 := a_1 - \frac{a_{fl} \cdot \sqrt{2}}{3} - \frac{(D + d_p)}{4} = 28.815 \text{ mm}$$

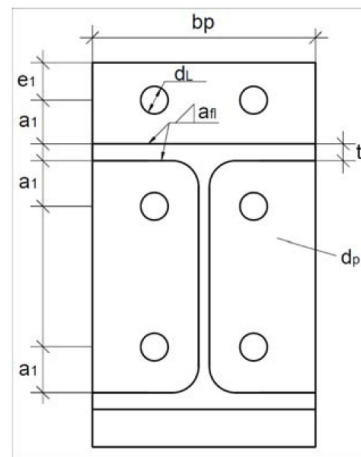
plastisches Widerstandsmoment in Flanschebene

$$M_{1,pl,d} := \frac{1.1 \sigma_{Rd} \cdot b_p \cdot d_p^2}{4} = 456 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Versagensmodus a

Versagen der Schraube unter Ausbildung eines plastischen Gelenks in der Flanschebene

$$Z_{t,a} := \frac{2}{e_1 + c_1} \cdot (n \cdot N_{R,d} \cdot e_1 + M_{1,pl,d}) = 706.137 \text{ kN}$$



Schrauben M20 10.9

Spannungsquerschnitt

$$A_s := 3.53 \text{ cm}^2$$

Schaftquerschnitt

$$A := 4.52 \text{ cm}^2$$

Streckgrenze

$$f_{y,B} := 900 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Zugfestigkeit

$$f_{u,B} := 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Anzahl Schraubenreihen

$$n_z := 2$$

Scheibendurchmesser

$$D := 44 \text{ mm}$$

Grenzzugkraft

$$N_{R,d} := \min \left(\frac{A_s \cdot f_{u,B}}{1.25 \cdot \gamma_M}, \frac{A \cdot f_{y,B}}{1.1 \cdot \gamma_M} \right) = 256.727 \text{ kN}$$

plastisches Widerstandsmoment in Schraubenebene

$$M_{2,pl,d} := \frac{1.1 \sigma_{Rd} \cdot (b_p - n \cdot d_L) \cdot d_p^2}{4} = 336 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

Versagensmodus b

Versagen der Stirnplatte unter Ausbildung plastischer Gelenke in der Flansch- und Schraubenebene

$$Z_{t,b} := 2 \cdot \frac{(M_{1,pl,d} + M_{2,pl,d})}{c_1} = 549.722 \cdot \text{kN}$$

Versagensmodus c

$$Z_{t,c} := 2 \cdot n \cdot N_{R,d} = 1.027 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Versagensmodus d

Querkrafttragfähigkeit der Stirnplatte

$$Z_{t,d} := 2 \cdot \left(b_p \cdot d_p \cdot \frac{\sigma_{Rd}}{\sqrt{3}} \right) = 957.352 \cdot \text{kN}$$

Maßgebende Grenzzugkraft

$$Z_{t,Rd} := \min(Z_{t,a}, Z_{t,b}, Z_{t,c}, Z_{t,d}) = 549.722 \cdot \text{kN}$$

Momententragfähigkeit

$$M_{y,Rd} := Z_{t,Rd} \cdot (h_t - t_t) = 239.349 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\eta_M := \frac{M_{Ed}}{M_{y,Rd}} = 100.021 \cdot \%$$

Anhang E: Bündiger Stirnplattenanschluss nach DIN 18800 und [5] in Anlehnung an "Typisierte Verbindungen im Stahlhochbau, 2. Auflage "(1979) [11]

Einwirkung

$$M_{Ed} := 82 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Träger IPE 450 S235

$$\text{Trägerhöhe} \quad h_t := 450 \text{ mm}$$

$$\text{Trägerbreite} \quad b_t := 190 \text{ mm}$$

$$\text{Trägerflanschdicke} \quad t_t := 14.6 \text{ mm}$$

Stirnplatte S235

$$\text{Stirnplattendicke} \quad d_p := 20 \text{ mm}$$

$$\text{Stirnplattenbreite} \quad b_p := 190 \text{ mm}$$

$$\text{Randabstand in Kraftrichtung} \quad e_1 := 95 \text{ mm}$$

$$\text{Lochdurchmesser} \quad d_L := 25 \text{ mm}$$

$$\text{Überstand} \quad \ddot{u} := 30 \text{ mm}$$

$$\text{Streckgrenze} \quad f_{y,k} := 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Bemessungsstreckgrenze} \quad f_{y,d} := \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 21.818 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Bemessung

Berechnungshebelarme

$$c_1 := e_1 - \ddot{u} - t_t - \frac{\left(\frac{D}{2} + d_p\right)}{2} = 29.4 \cdot \text{mm}$$

$$c_2 := \frac{D}{2} + d_p = 42 \cdot \text{mm}$$

Einwirkende Flanschzugkraft

$$Z_{Ed} := \frac{M_{Ed}}{(h_t - t_t)} = 188.333 \cdot \text{kN}$$

Überprüfung der Querkraftbeanpruchung infolge Flanschzugkraft und Flanschbeanspruchung infolge Moment

Auslastung der Stirnplatte (Querkraft infolge Flanschzugkraft)

$$\eta_2 := \frac{Z_{Ed}}{\left[\frac{f_{y,d}}{\sqrt{3}}\right] \cdot b_p \cdot d_p} = 39.344 \cdot \%$$

Schrauben M24 10.9

$$\text{Schaftquerschnitt} \quad A := 4.52 \text{ cm}^2$$

$$\text{Spannungsquerschnitt} \quad A_{Sp} := 3.53 \text{ cm}^2$$

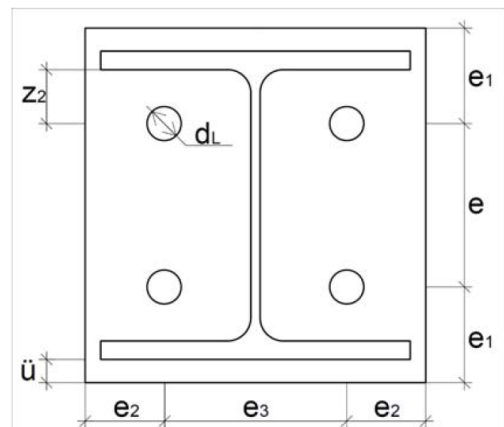
$$\text{Zugfestigkeit} \quad f_{u,B} := 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Streckgrenze} \quad f_{y,B} := 900 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Anzahl Schraubenreihen} \quad n_z := 2$$

$$\text{Scheibendurchmesser} \quad D := 44 \text{ mm}$$

$$\text{Sicherheitsbeiwert} \quad \gamma_M := 1.1$$



Auslastung des Flansches

$$\eta_1 := \frac{Z_{Ed}}{f_{y,d} \cdot b_t \cdot t_t} = 31.117 \cdot \%$$

Ermittlung des plastischen Widerstandsmomentes $M_{I,pl}$ unter Berücksichtigung der einwirkenden Flanschezugkraft

Faktor zur Abminderung des plastischen Flanschwiderstandsmomentes infolge Flanschezugkraft

$$\nu := 1 - \left(\frac{Z_{Ed}}{f_{y,d} \cdot b_t \cdot t_t} \right)^2 = 0.903$$

Flanschwiderstandsmoment

$$M_{I,pl} := 1.1 \cdot f_{y,d} \cdot b_t \cdot \frac{t_t^2}{4} \cdot \nu = 2.195 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Das kleinere plastische Moment wird maßgebend !

$$M_{I,pl} := \min(M_{I,pl}, M_{III,pl}) = 2.195 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Plattenwiderstandsmoment im Schnitt 1

$$M_{III,pl} := 1.1 \cdot f_{y,d} \cdot b_p \cdot \frac{d_p^2}{4} = 4.56 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Abstützkraft K

$$K := \frac{1}{c_2} \cdot (c_1 \cdot Z_{Ed} - M_{I,pl}) = 79.577 \cdot \text{kN}$$

Überprüfung des Plattenmomentes im Schnitt 2

$$M_{II} := Z_{Ed} \cdot (c_1) - M_{I,pl} = 3.342 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{II,pl} := 1.1 \cdot f_{y,d} \cdot (b_p - n_z \cdot d_L) \cdot \frac{d_p^2}{4} = 3.36 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\eta_3 := \frac{M_{II}}{M_{II,pl}} = 99.472 \cdot \%$$

Überprüfung Versagenskriterium 4

$$M_{II,Q,Rd} := \left(\frac{f_{y,d}}{\sqrt{3}} \right) \cdot b_p \cdot d_p \cdot c_2 = 20.104 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\eta_4 := \frac{M_{II}}{M_{II,Q,Rd}} = 16.624 \cdot \%$$

Überprüfung der Schraubenkraft unter Abstützkräften

$$N_{R,d} := \min \left(\frac{A_{Sp} \cdot f_{u,B}}{1.25 \cdot \gamma_M}, \frac{A \cdot f_{y,B}}{1.1 \cdot \gamma_M} \right) = 256.727 \cdot \text{kN} \quad N_{Ed,K} := \frac{Z_{Ed} + K}{n_z} = 133.955 \cdot \text{kN}$$

$$\eta_5 := \frac{N_{Ed,K}}{N_{R,d}} = 52.178 \cdot \%$$

Überprüfung der Schraubenkraft ohne Abstützkräfte

$$N_{R,d} = 256.727 \cdot \text{kN}$$

$$N_{Ed} := \frac{0.5 M_{Ed}}{\left(h_t - e_1 - \frac{t_t}{2} + \ddot{u} \right)} = 108.552 \cdot \text{kN}$$

$$\eta_6 := \frac{N_{Ed}}{N_{R,d}} = 42.283 \cdot \%$$

maßgebende Auslastung

$$\eta_{\max} := \max(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6) = 99.472 \cdot \%$$

Anhang F: Stirnplattenanschluss nach DIN EN 1993-1-8 in Anlehnung an "Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau" [12]

Einwirkende Momente

$$M_{y,Ed.1} := 342 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (\text{überstehende Stirnplatte})$$

$$M_{y,Ed.2} := 172 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (\text{bündige Stirnplatte})$$

Profil IPE 450

$$\text{Trägerhöhe} \quad h := 450 \text{ mm}$$

$$\text{Trägerbreite} \quad b := 190 \text{ mm}$$

$$\text{Gurthöhe} \quad t_f := 14.6 \text{ mm}$$

$$\text{Stegbreite} \quad t_w := 9.4 \text{ mm}$$

$$\text{Ausrundung} \quad r := 21 \text{ mm}$$

$$\text{Momententragf.} \quad M_{c,Rd} := 400 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Hebelarme

$$\text{Schrauben- Flanschabstand 1} \quad z_1 := 50 \text{ mm}$$

$$\text{Schrauben- Flanschabstand 2} \quad z_2 := 50.4 \text{ mm}$$

$$\text{Schrauben- Stegabstand} \quad z := 50.3 \text{ mm}$$

Stirnplatte

$$\text{Höhe Platte} \quad h_p := 565 \text{ mm}$$

$$\text{Breite Platte} \quad b_p := 190 \text{ mm}$$

$$\text{Dicke Platte} \quad t_p := 25 \text{ mm}$$

$$e_1 := 35 \text{ mm}$$

$$e_2 := \frac{(b_p - 2 \cdot z - t_w)}{2} = 40 \cdot \text{mm}$$

$$p := h - 2z_2 - 2 \cdot t_f = 320 \cdot \text{mm}$$

$$p_1 := z_1 + z_2 + t_f = 115 \cdot \text{mm}$$

$$p_2 := b_p - 2 \cdot e_2 = 110 \cdot \text{mm}$$

$$\ddot{u}_p := h_p - h - e_1 - z_1 = 30 \cdot \text{mm}$$

Material S 235

$$\text{charakt. Streckgrenze} \quad f_{y,k} := 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{charakt. Zugfestigkeit} \quad f_{u,k} := 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\gamma_{M0} := 1.0$$

$$\gamma_{M1} := 1.1$$

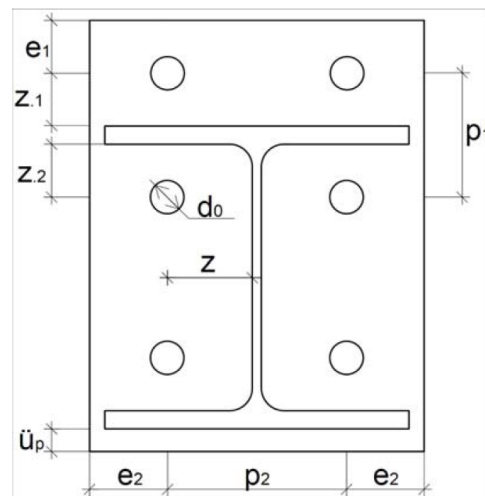
Schweißnaht

$$\text{Teilsicherheitsbeiwert} \quad \gamma_{Mw} := 1.25$$

$$\text{Nahtdicke Steg} \quad a_s := 5 \text{ mm}$$

$$\text{Nahtdicke Gurt} \quad a_g := 11 \text{ mm}$$

$$\text{Korrelationsbeiwert} \quad \beta_w := 0.8$$



Schrauben M 24 10.9

$$\text{Schraubendurchmesser} \quad d_s := 24 \text{ mm}$$

$$\text{Lochdurchmesser} \quad d_0 := 25 \text{ mm}$$

$$\text{Zugfestigkeit} \quad f_{u,b} := 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Schraubenquerschnitt Schaft} \quad A_s := 3.53 \text{ cm}^2$$

$$\text{Teilsicherheitsbeiwert} \quad \gamma_{M2} := 1.25$$

$$\text{Beiwerte} \quad \alpha_v := 0.5$$

$$\text{Faktor} \quad k_2 := 0.9$$

$$\text{Grenzzugkraft} \quad F_{t,Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{u,b} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 254.16 \cdot \text{kN}$$

Schraubenreihe 1 (äußere Schraubenreihe neben Zugflansch)

Wirksame Länge für unausgesteifte Flansche

$$m_x := z_1 - 0.8 \cdot a_G \cdot \sqrt{2} = 37.555 \cdot \text{mm}$$

$$e := \frac{b_p - p_2}{2} = 40 \cdot \text{mm}$$

$$e_x := e_1 = 35 \cdot \text{mm}$$

$$w := p_2 = 110 \cdot \text{mm}$$

Kreisförmige Anordnung

$$l_{\text{eff.cp.}} := \min(2 \cdot \pi \cdot m_x, \pi \cdot m_x + w, \pi \cdot m_x + 2 \cdot e) = 197.982 \cdot \text{mm}$$

Andere Anordnung

$$l_{\text{eff.nc.}} := \min(4 \cdot m_x + 1.25 \cdot e_x, e + 2m_x + 0.625 \cdot e_x, 0.5 \cdot b_p, 0.5 \cdot w + 2 \cdot m_x + 0.625 \cdot e_x) = 95 \cdot \text{mm}$$

Modus 1

$$l_{\text{eff.1.}} := \text{wenn}(l_{\text{eff.nc.}} \leq l_{\text{eff.cp.}}, l_{\text{eff.nc.}}, l_{\text{eff.cp.}}) = 95 \cdot \text{mm}$$

Modus 2

$$l_{\text{eff.2.}} := l_{\text{eff.nc.}} = 95 \cdot \text{mm}$$

$$m := m_x = 37.555 \cdot \text{mm}$$

$$n := \text{wenn}(e_x \leq 1.25 \cdot m, e_x, 1.25 \cdot m) = 35 \cdot \text{mm}$$

$$M_{\text{pl.1.Rd.}} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot l_{\text{eff.1.}} \cdot \frac{f_{y.k}}{\gamma_{M0}} = 3.488 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{pl.2.Rd.}} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot l_{\text{eff.2.}} \cdot \frac{f_{y.k}}{\gamma_{M0}} = 3.488 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Versagenart 1 = Plattenversagen

$$F_{T.1.Rd.} := \frac{4 \cdot M_{\text{pl.1.Rd.}}}{m} = 371.539 \cdot \text{kN}$$

Versagenart 2 = Schraubenversagen unter Abstützkräften

$$F_{T.2.Rd.} := \frac{2 \cdot M_{\text{pl.2.Rd.}} + n \cdot (2 \cdot F_{t.Rd.})}{m + n} = 341.366 \cdot \text{kN}$$

Versagenart 3 = reines Schraubenversagen

$$F_{T.3.Rd.} := 2 \cdot F_{t.Rd.} = 508.32 \cdot \text{kN}$$

maßgebende Flanschzugkraft Schraubenreihe 1

$$F_{Rd.1} := \min(F_{T.1.Rd.}, F_{T.2.Rd.}, F_{T.3.Rd.}) = 341.366 \cdot \text{kN}$$

Schraubenreihe 2 (innere Schraubenreihe neben Zugflansch)

$$m := z - 0.8 \cdot a_S \cdot \sqrt{2} = 44.643 \cdot \text{mm}$$

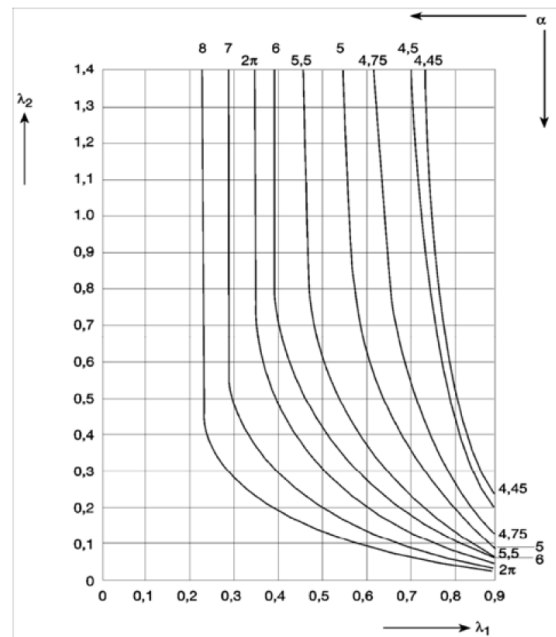
$$m_2 := z_2 - 0.8 \cdot a_G \cdot \sqrt{2} = 37.955 \cdot \text{mm}$$

$$e = 40 \cdot \text{mm}$$

$$\lambda_2 := \frac{m_2}{m + e} = 0.448$$

Eingabewert α aus nebestehenden Diagramm

$$\alpha := 5.7$$



$$\lambda_1 := \frac{m}{m + e} = 0.527$$

l_{eff} für die Betrachtung als einzelne Schraubenreihe

Kreisförmiges Muster

$$l_{\text{eff.cp}} := 2 \cdot \pi \cdot m = 280.501 \cdot \text{mm}$$

Modus 1

$$l_{\text{eff.1}} := \text{wenn}(l_{\text{eff.nc}} \leq l_{\text{eff.cp}}, l_{\text{eff.nc}}, l_{\text{eff.cp}}) = 254.466 \cdot \text{mm}$$

Berechnungshebelarme

$$n := \text{wenn}(e \leq 1.25 \cdot m, e, 1.25 \cdot m) = 40 \cdot \text{mm}$$

$$m = 44.643 \cdot \text{mm}$$

Plastische Widerstandsmomente

$$M_{\text{pl.1.Rd}} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot l_{\text{eff.1}} \cdot \frac{f_{y.k}}{\gamma_{M0}} = 934.367 \cdot \text{kN} \cdot \text{cm}$$

$$M_{\text{pl.2.Rd}} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot l_{\text{eff.2}} \cdot \frac{f_{y.k}}{\gamma_{M0}} = 934.367 \cdot \text{kN} \cdot \text{cm}$$

Versagenart 1 = Plattenversagen

$$F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{\text{pl.1.Rd}}}{m} = 837.188 \cdot \text{kN}$$

Versagenart 2 = Schraubenversagen unter Abstützkräften

$$F_{T.2.Rd} := \frac{2 \cdot M_{\text{pl.2.Rd}} + n \cdot (2 \cdot F_{t.Rd})}{m + n} = 460.996 \cdot \text{kN}$$

Versagenart 3 = reines Schraubenversagen

$$F_{T.3.Rd} := 2 \cdot F_{t.Rd} = 508.32 \cdot \text{kN}$$

Nachweis Trägersteg auf Zug

$$F_{t.wb.Rd} := l_{\text{eff.1}} \cdot t_w \cdot \frac{f_{y.k}}{\gamma_{M0}} = 562.115 \cdot \text{kN}$$

Beanspruchbarkeit Schraubenreihe 2

$$F_{Rd.2} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}, F_{t.wb.Rd}) = 460.996 \cdot \text{kN}$$

maßgebende Flanschzugkraft unter Berücksichtigung des plastischen Umlagerungsvermögens

Hebelarm für Schraubenreihe 2

$$h_1 := h + z_1 - 0.5 \cdot t_f = 492.7 \cdot \text{mm} \quad h_2 := h - z_2 - t_f - 0.5 \cdot t_f = 377.7 \cdot \text{mm}$$

"Eine Abminderung der Momentenbeanspruchbarkeit ist nötig" := wenn($F_{Rd.1} \leq 1.9 \cdot F_{t.Rd}$, "nein", "ja") = "nein"

$$F_{Rd.2} := \text{wenn} \left(F_{Rd.1} \leq 1.9 \cdot F_{t.Rd}, F_{Rd.2}, F_{Rd.2} \cdot \frac{h_2}{h_1} \right) = 460.996 \cdot \text{kN}$$

Nachweis des Druckflansches bei Momentenbelastung

$$F_{Rd.ges} := F_{Rd.1} + F_{Rd.2} = 802.362 \cdot \text{kN}$$

Beanspruchbarkeit des Druckflansches

$$F_{c.fb.Rd} := \frac{M_{c.Rd}}{(h - t_f)} = 918.695 \cdot \text{kN}$$

$$\Delta F_{c.fb} := F_{Rd.ges} - F_{c.fb.Rd} = -116.334 \cdot \text{kN}$$

"Eine Abminderung der Momentenbeanspruchbarkeit ist nötig" := wenn($\Delta F_{c.fb} < 0$, "nein", "ja") = "nein"

Flanschzugkraft falls Abminderung nötig

$$F_{Rd.2.c.fb} := F_{Rd.2} - \Delta F_{c.fb} = 577.33 \cdot \text{kN}$$

$$F_{Rd.2.2..} := \text{wenn}(\Delta F_{c.fb} > 0, F_{Rd.2.c.fb}, F_{Rd.2}) = 460.996 \cdot \text{kN}$$

Momententragfähigkeit $M_{j.Rd.1}$ (Tragfähigkeit überstehende Stirnplatte)

$$M_{j.Rd.1} := F_{Rd.1} \cdot h_1 + F_{Rd.2.2..} \cdot h_2 = 342.309 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\eta_{M.1} := \frac{M_{y.Ed.1}}{M_{j.Rd.1}} = 99.91 \cdot \%$$

Momententragfähigkeit $M_{j.Rd.2}$ (Tragfähigkeit bündige Stirnplatte)

Nachweis des Druckflansches bei Momentenbelastung

$$F_{Rd.ges.} := F_{Rd.2} = 460.996 \cdot \text{kN}$$

Beanspruchbarkeit des Druckflansches

$$F_{c.fb.Rd} = 918.695 \cdot \text{kN}$$

$$\Delta F_{c.fb.} := F_{Rd.ges.} - F_{c.fb.Rd} = -457.7 \cdot \text{kN}$$

"Eine Abminderung der Momentenbeanspruchbarkeit ist nötig" := wenn($\Delta F_{c.fb.} < 0$, "nein", "ja") = "nein"

Flanschzugkraft falls Abminderung nötig

$$F_{Rd.2.c.fb.} := F_{Rd.2} - \Delta F_{c.fb.} = 918.695 \cdot \text{kN}$$

$$F_{Rd.2.2...} := \text{wenn}(\Delta F_{c.fb.} > 0, F_{Rd.2.c.fb.}, F_{Rd.2}) = 460.996 \cdot \text{kN}$$

$$M_{j.Rd.2} := F_{Rd.2.2...} \cdot h_2 = 174.118 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\eta_{M.2} := \frac{M_{y.Ed.2}}{M_{j.Rd.2}} = 98.784 \cdot \%$$

Anhang G: Stirnplattenanschluss nach DIN EN 1993-1-8 in Anlehnung an "Typisierte Anschlüsse im Stahlhochbau" [13]

Einwirkende Momente

$M_{y,Ed.1} := 349 \text{ kN} \cdot \text{m}$ (Einwirkung überstehende Stirnplatte)

$M_{y,Ed.2} := 200 \text{ kN} \cdot \text{m}$ (Einwirkung bündige Stirnplatte)

Profil IPE 450

Trägerhöhe $h := 450 \text{ mm}$
 Trägerbreite $b := 190 \text{ mm}$
 Gurthöhe $t_f := 14.6 \text{ mm}$
 Stegbreite $t_w := 9.4 \text{ mm}$
 Ausrundung $r := 21 \text{ mm}$
 Momententrägheit $M_{c,Rd} := 400 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Hebelarme

Schrauben- Flanschabstand 1 $z_1 := 50 \text{ mm}$
 Schrauben- Flanschabstand 2 $z_2 := 50.4 \text{ mm}$
 Schrauben- Stegabstand $z := 50.3 \text{ mm}$

Schrauben M 24 10.9

Schraubendurchmesser $d_s := 24 \text{ mm}$
 Lochdurchmesser $d_0 := 25 \text{ mm}$
 Zugfestigkeit $f_{u,b} := 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
 Spannungsquerschnitt $A_s := 3.53 \text{ cm}^2$
 Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M2} := 1.25$
 Beiwerte $\alpha_v := 0.5$
 Faktor $k_2 := 0.9$
 Grenzzugkraft $F_{t,Rd} := \frac{k_2 \cdot f_{u,b} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 254.16 \cdot \text{kN}$

Stirnplatte

Höhe $h_p := 565 \text{ mm}$ Breite $b_p := 190 \text{ mm}$ Dicke $t_p := 25 \text{ mm}$ Überstand $e_1 := 35 \text{ mm}$

$$e_2 := \frac{(b_p - 2 \cdot z - t_w)}{2} = 40 \cdot \text{mm}$$

$$p_2 := b_p - 2 \cdot e_2 = 110 \cdot \text{mm}$$

$$p := h - 2 \cdot t_f - 2z_2 = 320 \cdot \text{mm}$$

$$\ddot{U}_p := h_p - h - e_1 - z_1 = 30 \cdot \text{mm}$$

$$p_1 := z_1 + z_2 + t_f = 115 \cdot \text{mm}$$

Material S 235

charakt. Streckgrenze $f_{y,k} := 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

charakt. Zugfestigkeit $f_{u,k} := 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

$\gamma_{M0} := 1.0$

$\gamma_{M1} := 1.1$

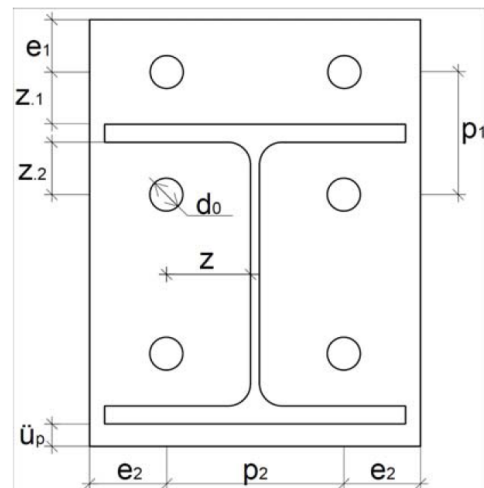
Schweißnaht

Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{Mw} := 1.25$

Nahtdicke Steg $a_s := 5 \text{ mm}$

Nahtdicke Gurt $a_g := 11 \text{ mm}$

Korrelationsbeiwert $\beta_w := 0.8$



Schraubenreihe 1 (äußere Schraubenreihe neben Zugflansch)

Wirksame Länge für unausgesteifte Flansche

$$m_x := z_1 - 0.8 \cdot a_G \cdot \sqrt{2} = 37.555 \cdot \text{mm}$$

$$e := \frac{b_p - p_2}{2} = 40 \cdot \text{mm}$$

$$e_x := e_1 = 35 \cdot \text{mm}$$

$$w := p_2 = 110 \cdot \text{mm}$$

Kreisförmige Anordnung

$$l_{\text{eff.cp.}} := \min(2 \cdot \pi \cdot m_x, \pi \cdot m_x + w, \pi \cdot m_x + 2 \cdot e) = 197.982 \cdot \text{mm}$$

Andere Anordnung

$$l_{\text{eff.nc.}} := \min(4 \cdot m_x + 1.25 \cdot e_x, e + 2m_x + 0.625 \cdot e_x, 0.5 \cdot b_p, 0.5 \cdot w + 2 \cdot m_x + 0.625 \cdot e_x) = 95 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Modus 1} \quad l_{\text{eff.1.}} := \text{wenn}(l_{\text{eff.nc.}} \leq l_{\text{eff.cp.}}, l_{\text{eff.nc.}}, l_{\text{eff.cp.}}) = 95 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Modus 2} \quad l_{\text{eff.2.}} := l_{\text{eff.nc.}} = 95 \cdot \text{mm}$$

$$m_{\cdot} := m_x = 37.555 \cdot \text{mm}$$

$$n := \text{wenn}(e_x \leq 1.25 \cdot m_{\cdot}, e_x, 1.25 \cdot m_{\cdot}) = 35 \cdot \text{mm}$$

$$M_{\text{pl.1.Rd.}} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot l_{\text{eff.1.}} \cdot \frac{f_{y.k}}{\gamma_{M0}} = 3.488 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{pl.2.Rd.}} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot l_{\text{eff.2.}} \cdot \frac{f_{y.k}}{\gamma_{M0}} = 3.488 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Versagenart 1 = Plattenversagen

$$F_{T.1.Rd.} := \frac{4 \cdot M_{\text{pl.1.Rd.}}}{m_{\cdot}} = 371.539 \cdot \text{kN}$$

Versagenart 2 = Schraubenversagen unter Abstützkräften

$$F_{T.2.Rd.} := \frac{2 \cdot M_{\text{pl.2.Rd.}} + n \cdot (2 \cdot F_{t.Rd.})}{m_{\cdot} + n} = 341.366 \cdot \text{kN}$$

Versagenart 3 = reines Schraubenversagen

$$F_{T.3.Rd.} := 2 \cdot F_{t.Rd.} = 508.32 \cdot \text{kN}$$

maßgebende Flanschzugkraft Schraubenreihe 1

maßgebende Flanschzugkraft für Normalkraftbelastung

$$F_{Rd.1} := \min(F_{T.1.Rd.}, F_{T.2.Rd.}, F_{T.3.Rd.}) = 341.366 \cdot \text{kN}$$

Schraubenreihe 2.1 und 2.2 (innere Schraubenreihe neben Flanschen)

$$m := z - 0.8 \cdot a_S \cdot \sqrt{2} = 44.643 \cdot \text{mm}$$

$$m_2 := z_2 - 0.8 \cdot a_G \cdot \sqrt{2} = 37.955 \cdot \text{mm}$$

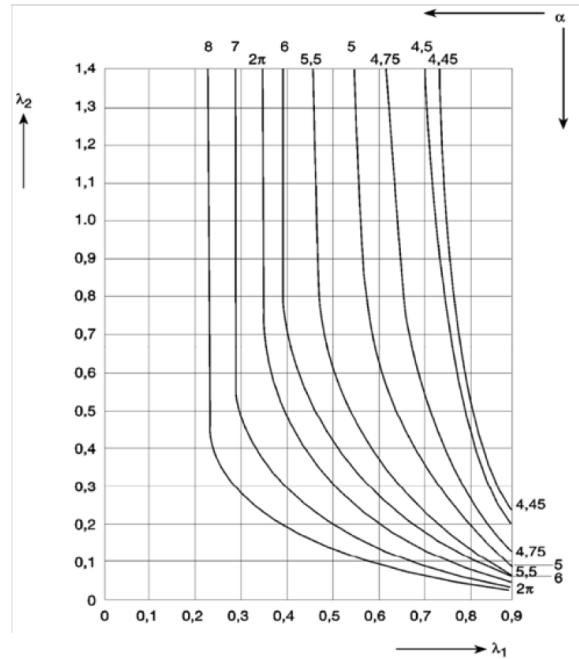
$$e = 40 \cdot \text{mm}$$

$$\lambda_1 := \frac{m}{m + e} = 0.527$$

$$\lambda_2 := \frac{m_2}{m + e} = 0.448$$

Eingabewert α aus nebenstehenden Diagramm

$$\alpha := 5.7$$



I_{eff} für die Betrachtung als einzelne Schraubenreihe

Kreisförmiges Muster

$$I_{\text{eff.cp.E}} := 2 \cdot \pi \cdot m = 280.501 \cdot \text{mm}$$

Modus 1

$$I_{\text{eff.1.E}} := \text{wenn}(I_{\text{eff.nc.E}} \leq I_{\text{eff.cp.E}}, I_{\text{eff.nc.E}}, I_{\text{eff.cp.E}}) = 254.466 \cdot \text{mm}$$

Plastische Widerstandsmomente

$$M_{\text{pl.1.Rd.E}} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot I_{\text{eff.1.E}} \cdot \frac{f_{y.k}}{\gamma_{M0}} = 934.367 \cdot \text{kN} \cdot \text{cm}$$

$$M_{\text{pl.2.Rd.E}} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot I_{\text{eff.2.E}} \cdot \frac{f_{y.k}}{\gamma_{M0}} = 934.367 \cdot \text{kN} \cdot \text{cm}$$

Berechnungshebelarme

$$n := \text{wenn}(e \leq 1.25 \cdot m, e, 1.25 \cdot m) = 40 \cdot \text{mm}$$

$$m = 44.643 \cdot \text{mm}$$

Versagenart 1 = Plattenversagen

$$F_{T.1.Rd.E} := \frac{4 \cdot M_{\text{pl.1.Rd.E}}}{m} = 837.188 \cdot \text{kN}$$

Versagenart 3 = reines Schraubenversagen

$$F_{T.3.Rd.E} := 2 \cdot F_{t.Rd} = 508.32 \cdot \text{kN}$$

Versagenart 2 = Schraubenversagen unter Abstützkräften

$$F_{T.2.Rd.E} := \frac{2 \cdot M_{\text{pl.2.Rd.E}} + n \cdot (2 \cdot F_{t.Rd})}{m + n} = 460.996 \cdot \text{kN}$$

Nachweis Trägersteg auf Zug

$$F_{t.wb.Rd.E} := I_{\text{eff.1.E}} \cdot t_w \cdot \frac{f_{y.k}}{\gamma_{M0}} = 562.115 \cdot \text{kN}$$

Maßgebende Grenzzugkraft für die Betrachtung als einzelne Schraubenreihe

$$F_{\text{Rd.E}} := \min(F_{T.1.Rd.E}, F_{T.2.Rd.E}, F_{T.3.Rd.E}, F_{t.wb.Rd.E}) = 460.996 \cdot \text{kN}$$

$F_{\text{Rd.E}}$ ist gleich der Grenzzugkraft der Schraubenreihe 2.1, da diese Schraubenreihe auch bei einem Gruppenversagen nicht abgemindert wird.

Beanspruchbarkeit Schraubenreihe 2.1

$$F_{\text{Rd.2.1}} := F_{\text{Rd.E}} = 460.996 \cdot \text{kN}$$

Überprüfung des plastischen Umlagerungsvermögens bei Momentenbeanspruchung

Hebelarm für Schraubenreihe 1

$$h_1 := h + z_1 - 0.5 \cdot t_f = 492.7 \cdot \text{mm}$$

Hebelarm für Schraubenreihe 2.1

$$h_{2.1} := h - z_2 - t_f - 0.5 \cdot t_f = 377.7 \cdot \text{mm}$$

"Eine Abminderung der Momentenbeanspruchbarkeit ist nötig" := wenn($F_{Rd.1} \leq 1.9 \cdot F_{t.Rd}$, "nein", "ja") = "nein"

$$F_{Rd.2.1} := \text{wenn} \left(F_{Rd.1} \leq 1.9 \cdot F_{t.Rd}, F_{Rd.2.1}, F_{Rd.2.1} \cdot \frac{h_{2.1}}{h_1} \right) = 460.996 \cdot \text{kN}$$

Überprüfung auf Gruppenversagen der Schraubenreihe 1 und 2

I_{eff} für die Betrachtung als Gruppe von Schraubenreihen

Kreisförmiges Muster

$$I_{eff.cp.G} := \pi \cdot m + p = 460.251 \cdot \text{mm}$$

Nicht kreisförmiges Muster

$$I_{eff.nc.G} := 0.5 \cdot p + \alpha \cdot m - (2 \cdot m + 0.625 \cdot e) = 300.18 \cdot \text{mm}$$

Modus 1

$$I_{eff.1.G} := \text{wenn}(I_{eff.nc.G} \leq I_{eff.cp.G}, I_{eff.nc.G}, I_{eff.cp.G}) = 300.18 \cdot \text{mm}$$

Modus 2

$$I_{eff.2.G} := I_{eff.nc.G} = 300.18 \cdot \text{mm}$$

Plastische Widerstandsmomente

$$M_{pl.1.Rd.G} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot I_{eff.1.G} \cdot \frac{f_{y.k}}{\gamma_{M0}} = 1.102 \times 10^3 \cdot \text{kN} \cdot \text{cm}$$

$$M_{pl.2.Rd.G} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot I_{eff.2.G} \cdot \frac{f_{y.k}}{\gamma_{M0}} = 1.102 \times 10^3 \cdot \text{kN} \cdot \text{cm}$$

Versagenart 1 = Plattenversagen

$$F_{T.1.Rd.G} := \frac{4 \cdot M_{pl.1.Rd.G}}{m} = 987.585 \cdot \text{kN}$$

Versagenart 2 = Schraubenversagen unter Abstützkräften

$$F_{T.2.Rd.G} := \frac{2 \cdot M_{pl.2.Rd.G} + n \cdot (2 \cdot F_{t.Rd})}{m + n} = 500.658 \cdot \text{kN}$$

Versagenart 3 = reines Schraubenversagen

$$F_{T.3.Rd.G} := 2 \cdot F_{t.Rd} = 508.32 \cdot \text{kN}$$

Nachweis Trägersteg auf Zug

$$F_{t.wb.Rd.G} := I_{eff.1.G} \cdot t_w \cdot \frac{f_{y.k}}{\gamma_{M0}} = 663.097 \cdot \text{kN}$$

Maßgebende Grenzzugkraft für die Betrachtung als Schraubengruppe

$$F_{Rd.G} := \min(F_{T.1.Rd.G}, F_{T.2.Rd.G}, F_{T.3.Rd.G}, F_{t.wb.Rd.G}) = 500.658 \cdot \text{kN}$$

"Gruppenversagen wird maßgebend" := wenn($F_{Rd.G} < F_{Rd.E}$, "ja", "nein") = "nein"

Tragfähigkeit Schraubenreihe 2.2

Wird ein Gruppenversagen der Schraubenreihen maßgebend muss die Tragfähigkeit der Schraubenreihe 2.2 abgemindert werden.

$$F_{Rd.2.2} := \text{wenn}(F_{Rd.G} < F_{Rd.E}, 2 \cdot F_{Rd.G} - F_{Rd.E}, F_{Rd.E}) = 460.996 \cdot \text{kN}$$

Überprüfung des plastischen Umlagerungsvermögens bei Momentenbeanspruchung

Hebelarm für Schraubenreihe 2.2

$$h_{2.2} := z_2 + \frac{t_f}{2} = 57.7 \cdot \text{mm} \quad h_{2.1} = 377.7 \cdot \text{mm}$$

$$\text{"Abminderung für die Momentenbea"} := \text{wenn}(F_{Rd.2.1} \leq 1.9 \cdot F_{t,Rd} \wedge F_{Rd.1} \leq 1.9 \cdot F_{t,Rd}, \text{"nein"}, \text{"ja"}) = \text{"nein"}$$

maßgebende Flanschzugkraft für Momentenbelastung unter Berücksichtigung des plastischen Umlagerungsvermögens

$$F_{Rd.2.2.a} := \text{wenn}\left(F_{Rd.2.1} \leq 1.9 \cdot F_{t,Rd}, F_{Rd.2.2}, F_{Rd.2.2} \cdot \frac{h_{2.2}}{h_{2.1}}\right) = 460.996 \cdot \text{kN}$$

$$F_{Rd.2.2.b} := \text{wenn}\left(F_{Rd.1} \leq 1.9 \cdot F_{t,Rd}, F_{Rd.2.2}, F_{Rd.2.2} \cdot \frac{h_{2.2}}{h_1}\right) = 460.996 \cdot \text{kN}$$

$$F_{Rd.2.2} := \min(F_{Rd.2.2.a}, F_{Rd.2.2.b}) = 460.996 \cdot \text{kN}$$

Nachweis des Druckflansches bei Momentenbelastung

$$F_{Rd.ges} := F_{Rd.1} + F_{Rd.2.1} + F_{Rd.2.2} = 1.263 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

Beanspruchbarkeit des Druckflansches

$$F_{c.fb,Rd} := \frac{M_{c,Rd}}{(h - t_f)} = 918.695 \cdot \text{kN}$$

$$\Delta F_{c.fb} := F_{Rd.ges} - F_{c.fb,Rd} = 344.662 \cdot \text{kN}$$

$$\text{"Eine Abminderung der Momentenbeanspruchbarkeit ist nötig"} := \text{wenn}(\Delta F_{c.fb} < 0, \text{"nein"}, \text{"ja"}) = \text{"ja"}$$

Abminderung der Grezzugkraft der Schraubenreihe 2.1 (falls nötig)

$$F_{Rd.2.c.fb} := F_{Rd.2.2} - \Delta F_{c.fb} = 116.334 \cdot \text{kN}$$

$$F_{Rd.2.2..} := \text{wenn}(\Delta F_{c.fb} > 0, \text{wenn}(F_{Rd.2.c.fb} < 0, 0, F_{Rd.2.c.fb}), F_{Rd.2.2.}) = 116.334 \cdot \text{kN}$$

$$\text{"Eine Abminderung der Momentenbeanspruchbarkeit ist nötig"} := \text{wenn}(F_{Rd.2.c.fb} < 0, \text{"ja"}, \text{"nein"}) = \text{"nein"}$$

$$F_{Rd.2.1..} := \text{wenn}(F_{Rd.2.c.fb} < 0, F_{Rd.2.1} + F_{Rd.2.c.fb}, F_{Rd.2.1.}) = 460.996 \cdot \text{kN}$$

Momententragfähigkeit $M_{j,Rd.1}$ (Tragfähigkeit überstehende Stirnplatte)

$$M_{j,Rd.1} := F_{Rd.1} \cdot h_1 + F_{Rd.2.1..} \cdot h_{2.1} + F_{Rd.2.2..} \cdot h_{2.2} = 349.021 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\eta_{M.1} := \frac{M_{y.Ed.1}}{M_{j,Rd.1}} = 99.994 \cdot \%$$

Momententragfähigkeit M_{j.Rd.2} (Tragfähigkeit bündige Stirnplatte)

Nachweis des Druckflansches bei Momentenbelastung

$$F_{Rd.ges.} := F_{Rd.2.1} + F_{Rd.2.2.a.} = 921.992 \cdot \text{kN}$$

Beanspruchbarkeit des Druckflansches

$$F_{c.fb.Rd} = 918.695 \cdot \text{kN}$$

$$\Delta F_{c.fb.} := F_{Rd.ges.} - F_{c.fb.Rd} = 3.296 \cdot \text{kN}$$

"Eine Abminderung der Momentenbeanspruchbarkeit ist nötig" := wenn($\Delta F_{c.fb.} < 0$, "nein", "ja") = "ja"

Flanschzugkraft falls Abminderung nötig

$$F_{Rd.2.c.fb.} := F_{Rd.2.2.a.} - \Delta F_{c.fb.} = 457.7 \cdot \text{kN}$$

$$F_{Rd.2.2...} := \text{wenn}(\Delta F_{c.fb.} > 0, F_{Rd.2.c.fb.}, F_{Rd.2.2.a.}) = 457.7 \cdot \text{kN}$$

$$M_{j.Rd.2} := F_{Rd.2.1} \cdot h_{2.1} + F_{Rd.2.2...} \cdot h_{2.2} = 200.527 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\eta_{M.2} := \frac{M_{y.Ed.2}}{M_{j.Rd.2}} = 99.737 \cdot \%$$

Anhang H: Stirnpattenanschluss nach AISC

Zugkraft

$$P_r := 464 \text{ kN}$$

Stirnplatte S 235

$$a := 40 \text{ mm}$$

$$b := 45 \text{ mm}$$

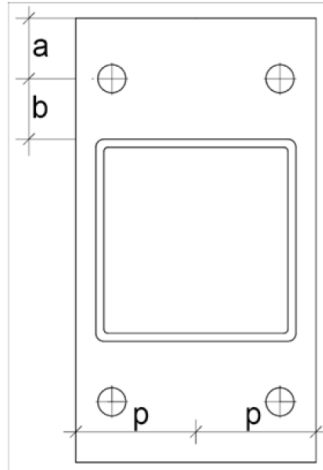
$$p := 195 \text{ mm}$$

Stirnplattendicke

$$t_p := 20 \text{ mm}$$

Streckgrenze

$$F_{y,p} := 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$



Hohlprofil 350 X 250 X 8mm

$$t := 8 \text{ mm}$$

Schrauben M 27 10.9

$$n := 4$$

Durchmesser

$$d_b := 27 \text{ mm}$$

Lochdurchmesser

$$d_h := 28 \text{ mm}$$

Spannungsquerschnitt

$$A_s := 4.59 \text{ cm}^2$$

Zugfestigkeit

$$F_{u,b} := 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Sicherheitsbeiwert

$$\Phi := 0.9$$

Bemessungs-
zugfestigkeit

$$\Phi r_n := \Phi \cdot F_{u,b} \cdot A_s = 413.1 \text{ kN}$$

Berechnungsvorwerte

$$a' := a + \frac{d_b}{2} = 53.5 \text{ mm}$$

$$b' := b - \frac{d_b}{2} + t = 39.5 \text{ mm}$$

$$\alpha := \frac{K \cdot \left(\frac{P_r}{4} \right)}{t_p^2} - 1 = -1.091 \times 10^{-4}$$

$$K := \frac{4 \cdot b'}{F_{y,p} \cdot p} = 3.448 \times 10^{-9} \frac{1}{\text{Pa}}$$

Schraubenversagen

Schreibweise nach AISC

$$T_r := \frac{P_r}{4} \cdot \left[1 + \left(\frac{b'}{a'} \right) \cdot \left(\frac{\alpha}{1 + \alpha} \right) \right] = 115.991 \text{ kN}$$

$$\eta_b := \frac{T_r}{\Phi r_n} = 28.078 \%$$

Alternative Schreibweise

$$M_{pl} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot p \cdot F_{y,p} = 4.583 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$T_r := \frac{1}{a'} \cdot \left[(a' + b') \cdot \frac{P_r}{4} - M_{pl} \right] = 115.991 \text{ kN}$$

$$\eta := \frac{T_r}{\Phi r_n} = 28.078 \%$$

Fließen der Platte

Schreibweise nach AISC

$$\delta := 1 - \frac{d_h}{p} = 0.856$$

$$R_n := \frac{t_p^2 \cdot (1 + \delta \cdot \alpha) \cdot 4}{K} = 464.007 \text{ kN}$$

$$\eta_p := \frac{P_r}{R_n} = 99.998 \%$$

Alternative Schreibweise

$$R_n := \left(\frac{M_{pl}}{b'} \right) \cdot 4 = 464.051 \text{ kN}$$

$$\eta_p := \frac{P_r}{R_n} = 99.989 \%$$

Maßgebend

$$\text{wenn } (\eta_b \geq \eta_p, \eta_b, \eta_p) = 99.998 \%$$

Anhang I : Stirnpaltnenanschluss nach Cidect

Zugkraft

$$N_i := 775 \text{ kN}$$

Abmessungen Stirnplatte

$$a := 40 \text{ mm}$$

$$b := 45 \text{ mm}$$

$$p := 195 \text{ mm}$$

Breite Platte $b_{SP} := 2 \cdot p = 390 \cdot \text{mm}$

Material S 235

charakt.
Streckgrenze

$$f_{y,p} := 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Schrauben M 27 10.9

Anzahl

$$n := 4$$

Durchmesser

$$d := 27 \text{ mm}$$

Lochdurchmesser

$$d' := 28 \text{ mm}$$

Zugfestigkeit

$$f_{u,b,k} := 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Spannungsquerschnitt

$$A_S := 4.59 \text{ cm}^2$$

Bemessungszugkraft

$$T := A_S \cdot f_{u,b,k} \cdot \Phi_b = 330.48 \cdot \text{kN}$$

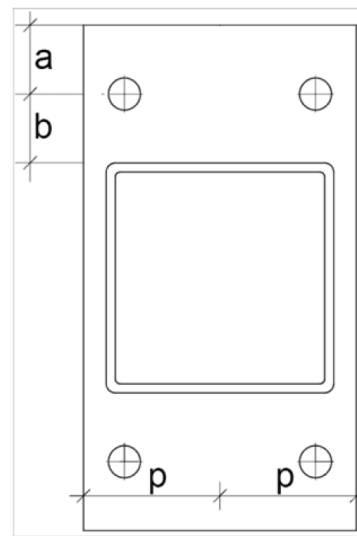
Profil

Wandungsstärke $t_i := 8 \text{ mm}$

Sicherheitsfaktoren

Platte $\Phi_p := 0.9$

Schraube $\Phi_b := \frac{0.9}{1.25} = 0.72$



Berechnungsvorwerte

$$a_{\text{eff}} := \text{wenn}(a > 1.25 \cdot b, 1.25 \cdot b, a) = 40 \cdot \text{mm} \quad a' := a_{\text{eff}} + \frac{d}{2} = 53.5 \cdot \text{mm} \quad b' := b - \left(\frac{d}{2}\right) + t_i = 39.5 \cdot \text{mm}$$

$$P_f := \frac{N_i}{n} = 193.75 \cdot \text{kN}$$

$$\delta := 1 - \frac{d'}{p} = 0.856$$

$$K := \frac{4 \cdot b'}{\Phi_p \cdot f_{y,p} \cdot p} = 3.831 \times 10^{-9} \frac{1}{\text{Pa}}$$

Plattenbemessung

Schreibweise nach Cidect

minimale Stirnplattendicke

$$t_{p,\text{min}} := \sqrt{\frac{K \cdot P_f}{1 + \delta}} = 19.996 \cdot \text{mm}$$

maximale Stirnplattendicke

$$t_{p,\text{max}} := \sqrt{K \cdot P_f} = 27.244 \cdot \text{mm}$$

gewählte Stirnplattendicken

$$t_p := 20 \text{ mm}$$

$$t_p > t_{p,\text{min}}, \quad t_p < t_{p,\text{max}}$$

alternative Schreibweise

minimale Stirnplattendicke

$$t_{p,\text{min}} := \sqrt{\frac{N_i \cdot b'}{0.9(p - d' + p) \cdot f_{y,p}}} = 19.996 \cdot \text{mm}$$

maximale Stirnplattendicke

$$t_{p,\text{max}} := \sqrt{\frac{N_i \cdot b'}{\Phi_p p \cdot f_{y,p}}} = 27.244 \cdot \text{mm}$$

Grenzzugkraft unter Berücksichtigung von Abstützkräften (Versagen der Schraube)

Schreibweise nach Cidect

$$\alpha := \left(\frac{K \cdot T}{t_p^2} - 1 \right) \cdot \left[\frac{a + \left(\frac{d}{2} \right)}{\delta \cdot (a + b + t_i)} \right] = 1.454$$

$$N_{i,S} := \frac{t_p^2 (1 + \delta \cdot \alpha) \cdot n}{K} = 937.846 \cdot \text{kN}$$

$$\eta := \frac{N_i}{N_{i,S}} = 82.636 \cdot \%$$

alternative Schreibweise

$$M_{pl} := 0.25 \cdot t_p^2 \cdot p \cdot f_{y,p} = 4.583 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$N_{i,S} := \left[\frac{1}{a' + b'} \cdot (a' \cdot T + \Phi_p M_{pl}) \right] \cdot n = 937.846 \cdot \text{kN}$$

$$\eta_{i,S} := \frac{N_i}{N_{i,S}} = 82.636 \cdot \%$$

Schraubenzugkraft bei der vorherrschenden Belastung N_i

Schreibweise nach Cidect

$$\alpha := \left(\frac{K \cdot P_f}{t_p^2} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\delta} = 0.999$$

$$T_f := P_f \cdot \left[1 + \frac{b'}{a'} \cdot \left(\frac{\delta \cdot \alpha}{1 + \delta \cdot \alpha} \right) \right] = 259.71 \cdot \text{kN}$$

$$\eta := \frac{T_f}{T} = 78.586 \cdot \%$$

alternative Schreibweise

$$T_{f,i} := \frac{1}{a'} \cdot [(a' + b') \cdot P_f - \Phi_p M_{pl}] = 259.71 \cdot \text{kN}$$

$$\eta_{f,i} := \frac{T_{f,i}}{T} = 78.586 \cdot \%$$

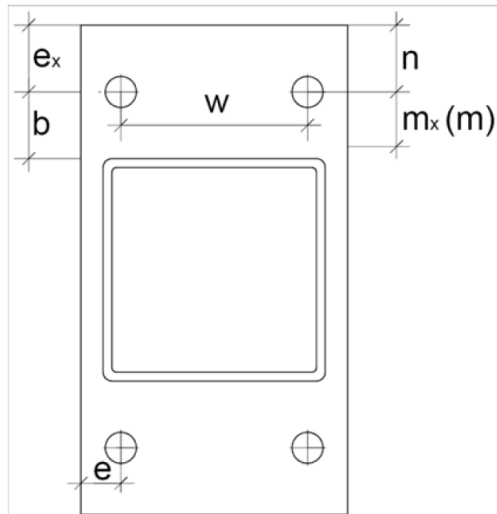
Anhang J: Hohlprofil Stirnplattenanschluss Anlehnung an DIN EN 1993-1-8

Zugkraft $N_{Ed} := 926 \text{ kN}$ Moment $M_{Ed} := 0 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Stirnplatte

Höhe Platte $h_p := 420 \text{ mm}$ Breite Platte $b_p := 390 \text{ mm}$ Dicke Platte $t_f := 20 \text{ mm}$ $w := 230 \text{ mm}$ Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M0} := 1.0$

Material S235

charakteristische Streckgrenze $f_{y,p} := 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ 

Schrauben M 27 10.9

Zugfestigkeit

 $F_{u,b} := 1000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Spannungsquerschnitt

 $A_s := 4.59 \text{ cm}^2$

Teilsicherheitsbeiwert

 $\gamma_{M2} := 1.25$

Grenzzugkraft

 $F_{t,Rd} := \frac{0.9 \cdot F_{u,b} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 330.48 \text{ kN}$

Schweißnaht

Nahtdicke

 $a_w := 9 \text{ mm}$

Profil

Profilhöhe

 $h_{RHS} := 250 \text{ mm}$

Profilbreite

 $b_{RHS} := 350 \text{ mm}$

Wandungsdicke

 $t_{RHS} := 8 \text{ mm}$

Nachweis T-Stummel

Berechnungshebelarme

 $e_x := 40 \text{ mm}$ $b := 45 \text{ mm}$ $m_x := b - 0.8 \cdot a_w \cdot \sqrt{2} = 34.818 \text{ mm}$ $e := \frac{b_p - w}{2} = 80 \text{ mm}$

effektiv wirksame Länge des unausgesteiften T - Stummels

Kreisförmige Anordnung

 $l_{eff,cp} := \min(2 \cdot \pi \cdot m_x, \pi \cdot m_x + w, \pi \cdot m_x + 2 \cdot e) = 218.766 \text{ mm}$

Andere Anordnung

 $l_{eff,nc} := \min(4 \cdot m_x + 1.25 \cdot e_x, e_x + 2 \cdot m_x + 0.625 \cdot e_x, 0.5 \cdot b_p, 0.5 \cdot w + 2 \cdot m_x + 0.625 \cdot e_x) = 174.635 \text{ mm}$

Modus 1

 $l_{eff,1} := \text{wenn}(l_{eff,nc} \leq l_{eff,cp}, l_{eff,nc}, l_{eff,cp}) = 174.635 \text{ mm}$

Modus 2

 $l_{eff,2} := l_{eff,nc} = 174.635 \text{ mm}$

Grenzzugkraft T-Stummel

$$m_{\cdot} := m_x = 34.818 \cdot \text{mm}$$

$$n := \text{wenn}(e_x \leq 1.25 \cdot m_{\cdot}, e_x, 1.25 \cdot m_{\cdot}) = 40 \cdot \text{mm}$$

Plastische Widerstandsmomente der Stirnplatte

$$M_{\text{pl.1.Rd}} := 0.25 \cdot t_f^2 \cdot l_{\text{eff.1}} \cdot \frac{f_{y.p}}{\gamma_{M0}} = 4.104 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{pl.2.Rd}} := 0.25 \cdot t_f^2 \cdot l_{\text{eff.2}} \cdot \frac{f_{y.p}}{\gamma_{M0}} = 4.104 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Versagenmodi 1 (Versagen der Platte)

$$F_{T.1.Rd} := \frac{4 \cdot M_{\text{pl.1.Rd}}}{m_{\cdot}} = 471.477 \cdot \text{kN}$$

Versagenmodi 2 (Versagen der Schrauben unter Abstützkräften)

$$F_{T.2.Rd} := \frac{2 \cdot M_{\text{pl.2.Rd}} + 2 \cdot n \cdot F_{t.Rd}}{m_{\cdot} + n} = 463.076 \cdot \text{kN}$$

Versagenmodi 3 (Versagen der Schrauben ohne Abstützkräften)

$$F_{T.3.Rd} := 2 \cdot F_{t.Rd} = 660.96 \cdot \text{kN}$$

maßgebender Versagensmodi

$$F_{Rd.1} := \min(F_{T.1.Rd}, F_{T.2.Rd}, F_{T.3.Rd}) = 463.076 \cdot \text{kN}$$

Zugtragfähigkeit T - Stummel

$$N_{Rd} := 2 \cdot F_{Rd.1} = 926.152 \cdot \text{kN}$$

$$\eta_N := \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} = 99.984 \cdot \%$$

Momententragfähigkeit T - Stummel

$$M_{Rd} := F_{Rd.1} \cdot (h_{RHS} - t_{RHS}) = 112.064 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\eta_M := \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = 0 \cdot \%$$

Überlagerung von Moment und Zugkraft

$$\eta_V := \frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = 99.984 \cdot \%$$

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Dresden, den 01. März 2017

Florian Kretzschmar